



TUGAS AKHIR – TM 091486

**PENGARUH VARIASI FRAKSI VOLUME,
TEMPERATUR, WAKTU *CURING* DAN *POST-
CURING* TERHADAP KARAKTERISTIK TEKAN
KOMPOSIT *POLYESTER* – PARTIKEL *HOLLOW
GLASS MICROSPHERES* (HGM) IM30K**

**CHANDRA PRASTYADI
NRP. 2112 106 051**

**Dosen Pembimbing
Wahyu Wijanarko, ST., MSc.
NIP. 198202092012121001**

**PROGRAM SARJANA
LABORATORIUM METALURGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**



FINAL PROJECT – TM 091486

**EFFECT OF VOLUME FRACTION VARIATION,
TEMPERATURE, HOLDING TIME OF CURING
AND POST-CURING ON COMPRESSIVE
PROPERTIES OF *POLYESTER - HOLLOW GLASS
MICROSPHERES* (HGM) IM30K COMPOSITES**

**CHANDRA PRASTYADI
NRP. 2112 106 051**

**Advisor lecturer
Wahyu Wijanarko, ST., MSc.
NIP. 198202092012121001**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017**

**PENGARUH VARIASI FRAKSI VOLUME,
TEMPERATUR, WAKTU *CURING* DAN *POST-CURING*
TERHADAP KARAKTERISTIK TEKAN KOMPOSIT
POLYESTER PARTIKEL *HOLLOW GLASS*
MICROSPHERES IM30K**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
CHANDRA PRASTYADI
NRP. 2112 106 051

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- | | | |
|----|---|---|
| 1. | <u>Wahyu Wijanarko, ST., M.Sc.</u>
NIP. 198202092012121001 |  (Pembimbing) |
| 2. | <u>Hari Subiyanto, Ir., M.Sc.</u>
NIP. 196006231988031002 |  (Penguji I) |
| 3. | <u>Sutikno, ST., MT., Dr.</u>
NIP. 197407032000031001 |  (Penguji II) |
| 4. | <u>Indra Sidharta, ST., M.Sc.</u>
NIP. 198006192006041004 |  (Penguji III) |

SURABAYA

JANUARI, 2017

**PENGARUH VARIASI FRAKSI VOLUME,
TEMPERATUR, WAKTU CURING DAN POST-CURING
TERHADAP KARAKTERISTIK TEKAN KOMPOSIT
POLYESTER – PARTIKEL HOLLOW GLASS
MICROSPHERES IM30K**

Nama Mahasiswa	: Chandra Prastyadi
NRP	: 2112 106 051
Jurusan	: Teknik Mesin - FTI ITS
Dosen Pembimbing	: Wahyu Wijanarko, S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Dewasa ini penggunaan material pada bidang industri, bidang otomotif, dan bidang dirgantara semakin berkembang pesat sehingga dituntut tersedianya material dengan properties dan kinerja yang terbaik serta mampu menggantikan peran logam konvensional. Hal ini dikarenakan keunggulan yang dimiliki material komposit antara lain kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap korosi yang lebih tinggi dari material logam lainnya. Salah satunya adalah pengembangan polimer foam komposit dengan penambahan Hollow Glass Microspheres (HGM). HGM sering digunakan sebagai filler karena keunggulan yang dimiliki antara lain memberikan bobot ringan pada foam, konduktivitas termal rendah, dan ketahanan terhadap tegangan kompresi yang melebihi foam lainnya. Aplikasi dari komposit jenis ini dapat digunakan pada bumper atau body kendaraan. Sehingga berat total kendaraan menjadi lebih ringan dan efisiensi bahan bakarnya meningkat. Sifat mekanik komposit ini dapat dioptimalkan dengan post-curing pada temperatur tertentu.

Penelitian dilakukan dengan mencampurkan resin polyester dan HGM. Spesimen uji tekan diproduksi sesuai dimensi ASTM D-695 dengan variasi fraksi volume HGM 10% hingga 17%. Spesimen menerima tiga perlakuan yang berbeda. Spesimen I di-curing pada temperatur kamar ($\pm 27^{\circ}\text{C}$) ditahan selama 24 jam. Spesimen II di-curing pada temperatur kamar ($\pm 27^{\circ}\text{C}$)

ditahan selama 24 jam lalu post-curing pada temperatur 90°C selama 5 jam. Spesimen III di-curing pada temperatur 90°C ditahan selama 24 jam. Untuk temperatur curing 90°C setelah 24 jam komposit akan tetap dibiarkan dalam oven hingga temperatur oven sama dengan temperatur ruang. Untuk mempelajari perbedaan sifat mekanik yang terjadi, dilakukan pengujian tekan.

Hasil yang didapatkan adalah dengan penambahan fraksi volume HGM 16% hingga 17% pada polyester dapat meningkatkan kekuatan tekan dan ketangguhannya. Kekuatan tekan maksimum komposit sebesar 116.7 MPa didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 17%. Sedangkan ketangguhan maksimum komposit sebesar $18,98 \times 10^{-3}$ (J/mm³) didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 17%. Peningkatan temperatur curing dapat meningkatkan jumlah ikatan crosslink pada matriks polyester. Komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 17% yang di-curing pada temperatur 90°C dengan waktu penahanan selama 24 jam merupakan komposit yang memiliki kekuatan dan ketangguhan tekan yang paling tinggi. Peningkatan jumlah ikatan crosslink pada matriks polyester akan meningkatkan kekuatan tekan pada komposit dengan fraksi volume HGM yang sama.

Kata Kunci: *perbandingan, eksperimen, pengaruh, fraksi, volume, temperatur, waktu, curing, post-curing, tekan, komposit, resin, polyester, HGM, crosslink.*

**EFFECT OF VOLUME FRACTION VARIATION,
TEMPERATURE, HOLDING TIME OF CURING AND
POST-CURING ON COMPRESSIVE PROPERTIES OF
POLYESTER - HOLLOW GLASS MICROSPHERES (HGM)
IM30K COMPOSITES**

Name	: Chandra Prastyadi
Student ID	: 2112 106 051
Department	: Teknik Mesin FTI-ITS
Advisor Lecturer	: Wahyu Wijanarko, ST., MSc.

ABSTRACT

Nowadays, the materials used in industrial, automotive and aerospace fields are growing rapidly so that it requires the availability of materials with the best properties and performance and that are able to replace the role of conventional metals. This is due to the advantages of composite materials which include high strength, toughness and corrosion resistance higher than other metal materials. One is the development of polymer foam composites by the addition of Hollow Glass Microspheres (HGM). HGM is often used as a filler for its advantages include providing a light weight on the foam, low thermal conductivity and resistance to compressive stresses more than on other foams. The application of this type of composite can be used for bumper or vehicle body so that the total weight of the vehicle will be lighter and that it will increase the fuel efficiency. The mechanical properties of the composite can be optimized by post-curing at a particular temperature.

The study was done by mixing resin polyester and HGM. The specimens were produced according to dimension of ASTM D-695 with variation of HGM volume fraction of 10% to 17%. The specimens received three different treatments. Specimen I was cured at room temperature ($\pm 27^{\circ}\text{C}$) and detained for 24 hours. Specimen II was also cured at room temperature ($\pm 27^{\circ}\text{C}$) and detained for 24 hours and then post-cured at a temperature of 90°

C for 5 hours. Specimen III was cured at a temperature of 90 ° C and detained for 24 hours. For curing temperature of 90 ° C after 24 hours being detained, the composites will be left in the oven until the oven temperature is equal to the room temperature. To study the differences of their mechanical properties, it requires some compression tests.

The results from the study above show that the addition of HGM volume fraction of 16% to 17% polyester can increase the compressive strength and improve the toughness. The maximum compressive strength of 116.7 MPa was obtained from adding HGM volume fraction of 17%. While, the maximum toughness of 18.98×10^{-3} (J / mm³) was obtained from adding HGM volume fraction of 17%. The increased curing temperature can increase the amount of crosslink bonds in the polyester matrix. Composites with the addition of HGM volume fraction of 17% which were cured at a temperature of 90 ° C with detaining time for 24 hours are the ones that have the highest compressive strength and toughness. Increasing the number of crosslink bonds in the polyester matrix will improve the strength in composites with the same HGM volume fraction.

Keywords: comparison, experiment, effect, fractions, volume, temperature, time, curing, post-curing, compress, composite, resin, polyester, HGM, crosslink.

KATA PENGANTAR

Assalaamu 'alaikum Warohmatulloh Wabarokatuh

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. karena atas segala limpahan rahmat dan anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul Pengaruh Variasi Fraksi Volume, Temperatur, Waktu *Curing* dan *Post-curing* Terhadap Karakteristik Tekan Komposit *Polyester* – Partikel *Hollow Glass Microspheres* (HGM) im30k.

Tugas akhir ini disusun untuk melengkapi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana di Jurusan Teknik Mesin ITS, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selanjutnya penulis ingin mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah membantu terselesaikannya penelitian Tugas Akhir ini, antara lain:

1. Ibunda tercinta, **Endang Utami**, untuk segala doa, restu, kasih sayang, pengorbanan, dan motivasi yang selalu dilimpahkan kepada penulis.
2. Ibu tercinta, **dr. Nunuk Mardiana, SpPD.**, untuk segala doa, restu, kasih sayang, perhatian dan motivasi yang selalu dilimpahkan kepada penulis.
3. Kedua adik saya yang tersayang, **Adhelina Prastyca** dan **Rehan Prasmantara** terima kasih sudah menjadi penambah motivasi.
4. **Wahyu Wijanarko, ST., MSc.**, selaku dosen pembimbing yang telah membimbing penulis hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini. Terima kasih untuk semua waktu, kritik dan saran yang diberikan ditengah – tengah kesibukan bapak.
5. Bapak **Dr. Eng, Sutikno, ST. MT.**, Bapak **Hari Subiyanto, Ir., M.Sc.**, dan Bapak **Indra Sidharta, ST., MSc.**, selaku

dosen penguji dan pembahas tugas akhir. Terima kasih atas nasehat, ilmu, kritik dan saran yang telah diberikan.

6. **Emeralda Brilian Agnia** sebagai penambah motivasi dan pemberi semangat, bantuan, doa, perhatian, kesabaran, dan cinta kepada penulis hingga terselesaikannya Tugas Akhir.
7. Keluarga Bapak **dr. Stefanus Lawujan** dan Bapak **Nanda Dityawan SH. MM.**, terimakasih atas doa dan semangatnya.
8. Sahabat terbaik anggota **“Wahyu Illahi”**, **Khisni Sains** dan **Muhammad Hafid** yang tak pernah bosan dalam membantu, menasehati dan mendoakan segala yang terbaik. Makasi,bro.
9. Teman-teman di **Laboratorium Metalurgi Teknik Mesin ITS**, ifa, tasa, safaat, gani, sony, amri, esa, mas faisal, ica, wira, oxy, beckham, dll terimakasih atas bantuan, dukungan, dan saran-saran yang telah diberikan.
10. Seluruh teman-teman Angkatan 2012 LJ-S1 Teknik Mesin ITS, terima kasih atas bantuan, doa, dan kebersamaannya selama kuliah di kampus Teknik Mesin tercinta.
11. Semua karyawan dan Bapak Ibu Dosen di jurusan Teknik Mesin ITS yang telah memberikan bantuan dan ilmunya kepada penulis.
12. Serta semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuannya yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis sadar bahwa penulisan tugas akhir ini memiliki banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan dan kesempurnaan tugas akhir ini. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi semua. Amin.

Wassalaamu 'alaikum Warohmatulloh Wabarokatuh

Surabaya, Januari 2017

Penulis.

DAFTAR ISI

HALAMAN DEPAN	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT.....	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xviii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Komposit.....	5
2.1.1 Matriks	7
2.1.2 Penguat (<i>reinforce</i>).....	8
2.2 Komposit Berpenguat Partikel (<i>Particulate Composite</i>)	10
2.3 Perbandingan Komposit Dengan Logam Lain	11
2.4 <i>Polymer Matrix Composite</i> (PMC).....	12
2.5 Resin <i>Unsaturated Polyester</i>	13
2.6 <i>Hollow Glass Microsphere</i> (HGM)	15
2.7 Aditif	22

2.8 Pengujian Tekan	22
2.9 Proses Curing	25
2.10 Proses Post-Curing	27
BAB 3 METODE PENELITIAN	33
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	33
3.2 Persiapan Spesimen.....	34
3.2.1 Perhitungan spesimen.....	34
3.2.2 Tabel perhitungan volume HGM dan polyester	36
3.2.3 Tabel perhitungan berat dan densitas	36
3.3 Material bahan.....	37
3.4 Peralatan yang digunakan.....	38
3.5 Variabel penelitian	41
3.6 Langkah – Langkah Percobaan.....	45
3.6.1 Pembentukan Komposit	45
3.6.2 Pengamatan Bentuk Fisik Komposit	46
3.6.3 Pembentukan Spesimen.....	46
3.7 Pelaksanaan Uji Spesimen.....	47
3.7.1 Pengujian Tekan.....	47
3.7.2 Prosedur Uji Tekan	47
BAB 4 DATA HASIL PERCOBAAN	49
4.1 Data Hasil Pengujian Tekan Komposit.....	49
4.1.1 Pengaruh Penambahan Fraksi Volume HGM Terhadap <i>Density</i> Komposit <i>Polyester</i> - HGM.....	53

4.1.2 Pengaruh Penambahan Fraksi Volume HGM dan <i>Curing, Post-curing Terhadap Kekuatan Tekan</i> Komposit.....	54
4.1.3 Pengaruh Penambahan Fraksi Volume HGM dan <i>Curing, Post-curing Terhadap Ketangguhan</i> Komposit.....	56
4.1.4 Hasil Pengujian Tekan Pengaruh Penambahan Fraksi Volume HGM 18%, 20%, 30% Terhadap Kekuatan Tekan dan Ketangguhan Komposit C, <i>Curing</i> Temperatur 90°C, waktu penahanan 24 jam	58
4.2 Hasil Pengamatan Pola Patahan Hasil Pengujian Tekan.....	61
BAB 5 ANALISA DAN PEMBAHASAN	33
5.1 Pembahasan Pengaruh Variasi Fraksi Volume HGM Terhadap Kekuatan Tekan Komposit.....	65
5.2 Pengamatan Hasil SEM Pada Pecahan Spesimen.....	69
5.3 Perbandingan Pengaruh Penambahan Fraksi Volume HGM, Temperatur, Waktu <i>Curing</i> dan <i>Post-curing</i> Terhadap Karakteristik Tekan dan Ketangguhan antara Resin <i>Polyester</i> dan <i>Epoxy</i>	76
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN.....	81
6.1 Kesimpulan	81
6.2 Saran	82
DAFTAR PUSTAKA	83
BIODATA PENULIS	87

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi Komposit	6
Gambar 2.2	Fase – fase dalam komposit.....	7
Gambar 2.3	Komposit berpenguat serat	8
Gambar 2.4	Komposit berpenguat lamina	9
Gambar 2.5	Komposit berpenguat partikel.....	9
Gambar 2.6	Jenis komposit hibrida	10
Gambar 2.7	Komposit butir.....	10
Gambar 2.8	Perbandingan komposit dengan logam lain	11
Gambar 2.9	Ikatan molekul pada polimer.....	13
Gambar 2.10	<i>Hollow Glass Microsphere</i>	16
Gambar 2.11	Kekuatan tarik meningkat pada spesimen dengan penambahan fraksi volume HGM sebanyak 15%	20
Gambar 2.12	Tegangan bending maksimum didapatkan dari penambahan fraksi volume HGM 10%	21
Gambar 2.13	Perubahan benda yang disebabkan oleh tegangan tekan aksial	23
Gambar 2.14	Bentuk spesimen saat uji tekan	24
Gambar 2.15	Alat uji tekan	25
Gambar 2.16	Tipe rantai polimer	26
Gambar 2.17	Grafik Hasil Uji Tarik dan Modulus <i>Tensile</i> Antar Resin <i>Polyester</i> , <i>Vinylester</i> , dan <i>Epoxy</i> yang <i>Di-curing</i> dan <i>Post-curing</i>	29
Gambar 2.18	Grafik Nilai Tegangan Bending dan Modulus Elastisitas Komposit Pada Beberapa Perlakuan <i>Post-Curing</i>	30
Gambar 2.19	Tegangan bending maksimum ketika spesimen ditahan pada temperatur 90°C selama 5 jam	31
Gambar 2.20	Kekuatan tarik maksimum ketika spesimen ditahan pada temperatur 90°C selama 5 jam	32

Gambar 3.1	Skema diagram alir penelitian	33
Gambar 3.2	Resin <i>polyester</i> 157	37
Gambar 3.3	HGM jenis iM30K.....	37
Gambar 3.4	Katalis (MEKPO)	38
Gambar 3.5	<i>Wax</i>	38
Gambar 3.6	Cetakan pipa PVC	38
Gambar 3.7	<i>Heater</i> konvensional.....	39
Gambar 3.8	Thermometer	39
Gambar 3.9	Mesin uji tekan <i>Universal Testing Machine</i> Shimadzu Corp.....	40
Gambar 3.10	<i>Scanning Electron Microscope</i> Zeiss EVO MA 10	40
Gambar 3.11	Timbangan digital.....	41
Gambar 3.12	Dimensi spesimen uji tekan	47
Gambar 4.1	Grafik <i>density</i> komposit resin <i>polyester</i> terhadap penambahan fraksi volume HGM.....	53
Gambar 4.2	Grafik hasil uji tekan	54
Gambar 4.3	Grafik ketangguhan	56
Gambar 4.4	Grafik hasil uji tekan penambahan fraksi volume HGM 18%, 20%, 30% curing 90°C selama 24 jam	59
Gambar 4.5	Grafik ketangguhan penambahan fraksi volume HGM 18%, 20%, 30% curing 90°C selama 24 jam	60
Gambar 4.6	Foto pecahan spesimen uji tekan komposit penambahan HGM 10% <i>curing</i> temperatur 27°C selama 24 jam	61

Gambar 4.7	Foto pecahan spesimen uji tekan komposit penambahan HGM 17% <i>curing</i> temperatur 27°C selama 24 jam.....	61
Gambar 4.8	Foto pecahan spesimen uji tekan komposit HGM 17% <i>curing</i> temperatur 27°C selama 24 jam – <i>postcuring</i> 90°C selama 5 jam.....	62
Gambar 4.9	Foto pecahan spesimen uji tekan komposit penambahan HGM 17% <i>curing</i> temperatur 90°C selama 24 jam	63
Gambar 4.10	Foto pecahan spesimen uji tekan komposit penambahan HGM 18%, 20%, 30% <i>curing</i> temperatur 90°C selama 24 jam	63
Gambar 5.1	Perbandingan antara nilai tegangan hasil pengujian tekan dan nilai tegangan teoritis hasil perhitungan	66
Gambar 5.2	HGM dan fenomena <i>debonding</i> pada komposit (SEM) perbesaran 5000x	68
Gambar 5.3	Hasil SEM komposit dengan penambahan HGM 10% <i>curing</i> temperatur 27°C selama 24 jam.....	69
Gambar 5.4	Hasil SEM komposit dengan penambahan HGM 17% <i>curing</i> temperatur 27°C selama 24 jam.....	70
Gambar 5.5	Pecahan HGM yang telah rusak akibat pembebanan.....	70
Gambar 5.6	Hasil SEM komposit penambahan HGM 17 % <i>curing</i> temperatur 27°C selama 24 jam - <i>postcuring</i> 90 °C selama 5 jam.....	72
Gambar 5.7	Hasil SEM komposit dengan penambahan HGM 17 % <i>curing</i> temperatur 90°C selama 24 jam.....	73

Gambar 5.8	Grafik pengaruh penambahan fraksi volume HGM, temperatur, waktu <i>curing</i> dan <i>post-curing</i> terhadap nilai kekuatan tekan antara resin <i>polyester</i> dan <i>epoxy</i>	76
Gambar 5.9	Grafik pengaruh penambahan fraksi volume HGM, temperatur, waktu <i>curing</i> dan <i>post-curing</i> terhadap nilai ketangguhan antara resin <i>polyester</i> dan <i>epoxy</i>	78

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Spesifikasi resin Polyester	15
Tabel 2.2	Data spesifikasi teknis <i>Hollow Glass Microspheres</i> jenis IM30K.....	17
Tabel 2.3	Hasil Modulus Elastisitas dan Poisson ratio pada komposit <i>Polyester</i> – 25% HGM	18
Tabel 2.4	Hasil Modulus Young pada komposit <i>Polyester</i> – <i>Hollow Glass Microspheres</i> yang didapat dari Pengujian Tarik	19
Tabel 2.5	Data <i>glass transition temperature</i> (Tg) dari <i>polyester</i> resin menurut jurnal “ <i>Characterization and Failure Analysis of Plastics</i> ” oleh ASM International diterbitkan pada Desember 2003 pada halaman 117	28
Tabel 3.1	Perbandingan fraksi volume yang digunakan	36
Tabel 3.2	Perhitungan berat dan densitas	36
Tabel 3.3	Variasi fraksi volume HGM dan <i>polyester</i> untuk <i>curing</i> temperature 27°C (temperatur ruang) selama 24 jam	42
Tabel 3.4	Variasi fraksi volume HGM dan <i>polyester</i> untuk <i>curing</i> temperature 27°C selama 24 jam kemudian <i>post-curing</i> 90°C selama 5 jam	43
Tabel 3.5	Variasi fraksi volume HGM dan <i>polyester</i> <i>curing</i> temperature 90°C selama 24 jam	44

Tabel 4.1	Hasil uji tekan komposit <i>curing</i> temperatur 27°C selama 24 jam	50
Tabel 4.2	Hasil uji tekan komposit <i>curing</i> temperatur 27°C selama 24 jam lalu <i>post-curing</i> temperatur 90°C selama 5 jam	51
Tabel 4.3	Hasil uji tekan komposit <i>curing</i> temperatur 90°C selama 24 jam	52
Tabel 4.4	Hasil uji tekan komposit penambahan variasi fraksi volume HGM 18%, 20%, 30% komposit C <i>curing</i> temperatur 90°C selama 24 jam.....	59

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penerapan ilmu material, khususnya komposit terus berkembang, Hal ini didasari atas kebutuhan dan usaha manusia untuk mencari alternatif material yang memiliki sifat-sifat yang lebih baik dari sebelumnya dengan memanfaatkan pengolahan bahan dan teknologi yang berkembang. Komposit adalah suatu material yang terbentuk dari kombinasi antara dua atau lebih material pembentuk yang diproduksi dengan proses pencampuran. Material komposit memiliki keunggulan antara lain kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap korosi yang lebih tinggi dari material logam lainnya. Kelebihan tersebut yang mendorong material ini banyak dimanfaatkan sebagai aplikasi pengganti logam, bahan bangunan, otomotif, penahan panas, penyerap suara, dan lain-lain.

Salah satunya pengembangan polimer foam komposit adalah dengan penambahan *Hollow Glass Microspheres* (HGM). Penambahan HGM pada volume tertentu secara teoritis akan menaikkan kekuatan tekannya. Material ini diproduksi dengan cara mencampur resin *polyester* dengan jenis filler HGM. Penggunaan jenis filler ini memberi kontribusi pada pengurangan densitas, modifikasi ketangguhan retak dan ketahanan beban kejut.

HGM sering digunakan sebagai filler dalam material komposit ringan seperti busa sintaksis dan beton ringan. Filler yang banyak mengandung *sodium borosilicate* ini berbentuk *spherical*, berorongga, dan terdiri dari permukaan kaca yang kaku serta mengandung inert gas di dalamnya sehingga memiliki sifat yang unik seperti berat jenis yang rendah ($0,3 - 0,6 \text{ g/cc}$) ^[1], kekuatan tekan tinggi (3000-30.000 psi) serta titik leleh yang tinggi (600°C) dan konduktivitas thermal yang rendah. Ketika HGM ditambahkan pada *polyester* maka dapat memberikan keuntungan seperti

mengurangi densitas komposit, penyusutan serta mengurangi kemampuan menyerap air pada komposit sehingga dapat diaplikasikan pada peralatan bawah laut, bagian-bagian kendaraan, pipa, pembuatan tangki penyimpanan air dan minyak. Untuk meningkatkan sifat mekaniknya maka dilakukan proses *post-curing* dengan temperature tertentu. Tujuan dilakukannya *post-curing* adalah memperbaiki sifat mekanik komposit material dan juga untuk meminimalisir tegangan sisa pada komposit, sehingga diharapkan kekuatannya akan meningkat.

Tahun 2012, Irwan Nugraha Saputra ^[2] mengadakan penelitian pengaruh variasi penambahan fraksi volume HGM terhadap karakteristik kekuatan tarik komposit. Penelitian ini menggunakan matrix *polyester* dan *curing* pada temperatur kamar setelah itu akan dilakukan proses *post-curing* dengan suhu 60°C, 90 °C, 110 °C masing-masing selama 3 dan 5 jam untuk mencari pengaruhnya terhadap kekuatan tarik. Pada tahun 2013, Kevin Yoga ^[3] melakukan penelitian pengaruh variasi penambahan fraksi volume HGM terhadap karakteristik kekuatan bending komposit menggunakan resin *unsaturated polyester* dengan metode dan variasi yang sama seperti penelitian milik Irwan Nugraha Saputra. Dan pada tahun 2014, Widyansyah Ritonga ^[4] membahas tentang pengaruh dari variasi temperature *curing* pada suhu kamar, *curing* pada suhu kamar lalu *post-curing* 90°C selama lima jam, dan *curing* 90°C, serta penambahan fraksi volume HGM 15% hingga 20% terhadap karakteristik tekan komposit dengan *matrix epoxy*.

Pada penelitian ini akan dibahas tentang pengaruh dari variasi temperature *curing* pada suhu kamar (27 °C) selama 24 jam, *curing* 27 °C selama 24 jam lalu *post-curing* 90°C selama lima jam, dan *curing* 90°C selama 24 jam, serta penambahan fraksi volume HGM 10% hingga 17% terhadap karakteristik tekan komposit dengan *matrix polyester*. Sehingga nantinya penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan dalam bidang otomotif, bidang industri, bidang dirgantara dan sumbangan data bagi ilmu pengetahuan.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi fraksi volume HGM dan *matrix polyester* terhadap karakteristik tekan komposit?
2. Bagaimana pengaruh perbedaan temperature, waktu *curing* dan *post-curing* terhadap karakteristik tekan komposit dalam fraksi volume tetap?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa pengaruh variasi fraksi volume HGM dan *matrix polyester* terhadap karakteristik tekan komposit.
2. Menganalisa pengaruh perbedaan temperature, waktu *curing* dan *post-curing* terhadap karakteristik tekan komposit dalam fraksi volume tetap.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat mencapai tujuan yang diinginkan, maka batasan masalah yang diberikan adalah sebagai berikut:

1. Temperatur pada proses pembuatan dan pengujian dianggap konstan, yaitu 27°C.
2. Spesimen yang dihasilkan dari proses pencetakan dianggap baik (porositas maksimal yang diijinkan adalah 2%).
3. Hollow Glass Microsphere yang digunakan memiliki komposisi dan dimensi yang sama.

1.5 Sistematika Penulisan Penelitian

Penulisan di susun dalam enam bab yaitu pendahuluan, dasar teori, metodologi penelitian, data hasil penelitian, analisa data dan diskusi, serta kesimpulan. Adapun perinciannya adalah sebagai berikut:

- **BAB 1 PENDAHULUAN**

Pada bab pendahuluan dijelaskan tentang latar belakang penelitian, perumusan masalah, pembatasan masalah serta tujuan penelitian.

- **BAB 2 DASAR TEORI**

Pada bab dasar teori menjelaskan tentang teori-teori dasar mengenai komposit, karakteristik *polyester* dan *Hollow Glass Microsphere* (HGM), konsep proses *curing* dan *post-curing* serta konsep pengujian tekan.

- **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab metodologi penelitian dijelaskan tentang data spesimen yang digunakan, metode pengujian yang digunakan, diagram alir, metode pembuatan, metode pengumpulan data dan segala bentuk prosedur yang diperlukan untuk penelitian.

- **BAB 4 DATA HASIL PENELITIAN**

Pada bab ini menampilkan pengolahan data berupa grafik dan gambar dari hasil pengujian yang telah dilakukan.

- **BAB 5 ANALISA DATA DAN DISKUSI**

Pada bab analisa data dan diskusi menampilkan pembahasan dari data yang didapatkan saat pengujian. Bentuk patahan dan analisa kegagalan akan diamati dengan menggunakan foto makro dan foto SEM.

- **BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab kesimpulan dan saran diberikan dengan menarik kesimpulan dari hasil percobaan yang telah dianalisa beserta dengan saran untuk penelitian berikutnya.

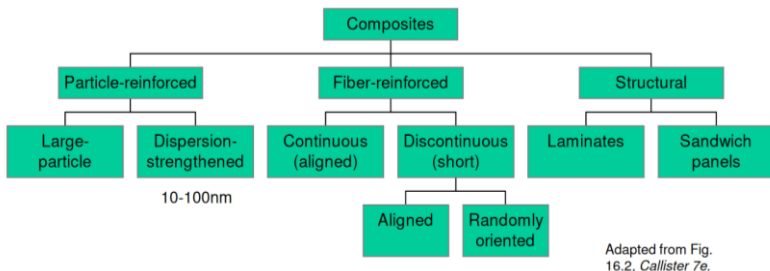
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Komposit

Komposit adalah suatu material yang terdiri dari kombinasi dua atau lebih unsur pokok yang digabungkan pada level makroskopik dan tidak larut satu sama lain atau memiliki sifat yang berbeda^[5]. Komposit memiliki sifat-sifat sebagai berikut yaitu kekuatan dan kekakuan tinggi, sangat ringan, ketahanan korosi oleh bahan kimia dan cuaca baik, mudah dibentuk, ketahanan creep tinggi, dan kekuatan tarik pada temperatur tinggi baik. Dengan beberapa kelebihan tersebut, menyebabkan komposit banyak diaplikasikan dalam peralatan-peralatan berteknologi tinggi di bidang industri, transportasi, dan konstruksi bangunan.

Material ini terdiri dari dua bahan penyusun, yaitu bahan utama sebagai pengisi dan pengikat (*matriks*) dan bahan pendukung sebagai penguat (*reinforce*). Bahan utama membentuk matrik dimana bahan pengisi ditanamkan di dalamnya. Bahan pengisi dapat berbentuk serat, partikel, serpihan atau juga dapat berbentuk lain. Antara matriks dan penguat akan terbentuk lapisan antarmuka (*interface*) yang terjadi akibat reaksi dengan *wetting agent*. Dengan penggabungan material tersebut, maka akan didapatkan suatu material yang sifatnya lebih baik dari material penyusunnya, yang merupakan gabungan dari matriksnya dengan penguatnya.



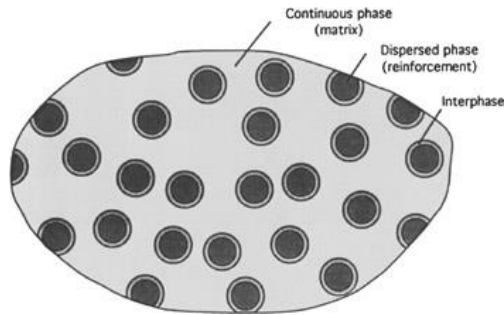
Gambar 2.1 Klasifikasi Komposit [6]

Kelebihan material ini jika dibandingkan dengan logam adalah perbandingan kekuatan terhadap berat / densitas yang lebih baik serta ketahanan korosinya. Sehingga banyak dikembangkan material alternatif sebagai pengganti logam dikarenakan keterbatasan jumlah yang ada di alam. Komposit yang paling banyak dikembangkan adalah adalah PMC (*Polymer matrix Composites*). Komposit jenis ini terdiri dari polimer sebagai matriks baik itu *thermoplastic* maupun jenis *thermosetting*. Thermosets yang paling lazim dalam kelompok ini adalah polyester tak jenuh, resin phenol formaldehida, melamin formaldehida, *epoxy* dan silicone. Sedang bahan *thermoplastic* yang lazim dipergunakan sebagai matriks misalnya polyolefin (polyethylene, polypropylene), vinylic, polyamida.

Komposit polimer yang diisi dengan *filler* banyak dikembangkan karena aplikasinya yang luas dan harga yang relative murah. Penggunaan *filler* merupakan metode yang cepat dan murah untuk memodifikasi sifat mekanik. Secara umum, *filler* digunakan untuk meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan modulus elastisitasnya, tetapi juga dapat dilakukan modifikasi terhadap nilai kekuatan (*strength*), ketangguhan (*toughness*), stabilitas, konduktivitas panas dan listrik.

2.1.1 Matriks

Dalam teknologi komposit, matriks dapat didefinisikan sebagai suatu material yang berfungsi sebagai pengisi dan pengikat yang mendukung, melindungi, dan dapat mendistribusikan beban dengan baik ke material penguat komposit.



Gambar 2.2 Fase – fase dalam komposit [7]

Berdasarkan jenis matriksnya, maka komposit dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu:

1. PMC (*Polymer Matrix Composites*)

Merupakan komposit yang menggunakan material polimer sebagai matriksnya. Contohnya adalah: GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) dan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*).

2. CMC (*Ceramic Reinforced Composites*)

Adalah komposit yang menggunakan material keramik sebagai fase pengisiannya (matriks). Contohnya adalah: Boron Reinforced Sic.

3. MMC (*Metal Matrix Composite*)

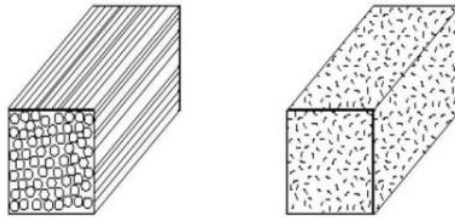
Merupakan komposit yang menggunakan material logam sebagai matriks. Contohnya adalah: Carbon reinforced Aluminium.

Komposit berbahan matriks logam umumnya sering digunakan dalam bidang kedirgantaraan dan komponen-komponen otomotif. Komposit berbahan matriks keramik digunakan untuk keperluan perlindungan panas seperti pada pesawat luar angkasa. Komposit berbahan matriks polimer jauh lebih populer karena dapat digunakan pada berbagai aplikasi seperti peralatan rumah tangga hingga ke peralatan elektronik.

2.1.2 Penguat (*reinforce*)

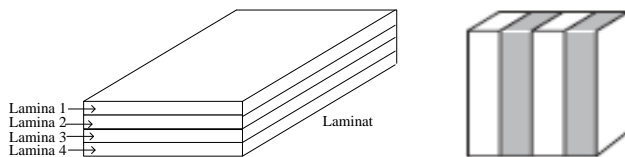
Penguat (*reinforce*) dalam teknologi compost dapat didefinisikan sebagai suatu material yang berfungsi sebagai penguat yang memiliki sifat lebih kuat dari fase matriks dan merupakan suatu konstruksi / rangka tempat melekatnya matriks. Beberapa bentuk penguat (*reinforcement*) dari material komposit adalah :

1. Material komposit serat (*fibricus composite*), yaitu komposit yang terdiri dari serat dan bahan dasar yang diproduksi secara fabrikasi, misalnya serat + resin sebagai bahan perekat. Sebagai contoh adalah FRP (*Fiber Reinforce Plastic*), plastik diperkuat dengan serat. FRP umum digunakan, dan sering disebut sebagai *fiber glass*.



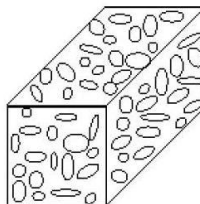
Gambar 2.3 Komposit berpenguat serat ^[8]

2. Komposit lapis (*laminated composite*), yaitu komposit yang terdiri dari lapisan dan bahan penguat, contohnya *polywood*, *laminated glass* yang sering digunakan sebagai bahan bangunan dan kelengkapannya. Seperti pada gambar 2.4 berikut.



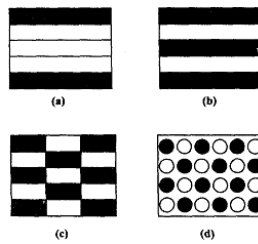
Gambar 2.4 Komposit berpenguat lamina ^[8]

3. Komposit partikel (*particulate composite*), yaitu komposit yang terdiri dari partikel dan bahan penguat seperti butiran (batu dan pasir) yang diperkuat dengan semen yang sering kita jumpai sebagai beton.



Gambar 2.5 Komposit berpenguat partikel ^[8]

4. *Hybrid Composite*, adalah merupakan suatu jenis komposit yang penguatnya terdiri atas lebih dari satu jenis penguat ke dalam satu matriks. Tingkat pencampuran dapat dalam skala kecil (serat) ataupun dalam skala besar (*layer*). Tujuan dari hibridisasi adalah untuk menyusun suatu material baru yang mengandung keunggulan dari penyusunnya. Gambar 2.6 merupakan bentuk-bentuk susunan komposit hibrida.

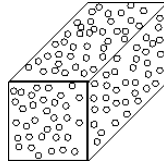


Gambar 2.6 Jenis komposit hibrida berdasarkan penyusunnya: (a) *sandwich*, (b) *interply*, (c) *intraply*, dan (d) *intimately mixed* ^[8]

2.2 Komposit Berpenguat Partikel (*Particulate Composite*)

Komposit partikel adalah salah satu jenis komposit di mana dalam matriks ditambahkan material lain berupa serbuk/butir. Dalam komposit partikel, material penambah terdistribusi secara acak atau kurang terkontrol. Pengaruh partikel pada sifat mekanik komposit tergantung pada dimensi partikel^[9]. Partikel yang sangat kecil (kurang dari 0,25 mikron) dan halus didistribusikan kedalam matriks yang berfungsi untuk menghambat pergerakan dislokasi dan deformasi material. Efek penguatan tersebut mirip dengan pengerasan presipitasi. Berbeda dengan pengerasan presipitasi, dimana efek penguatan tersebut akan menghilang pada temperature

tinggi ketika partikel endapan larut dalam matriks. Komposit partikel tetap stabil pada suhu tinggi sehingga efek penguatan tetap bertahan. Banyak dari bahan komposit yang dirancang untuk bekerja dalam aplikasi suhu tinggi.

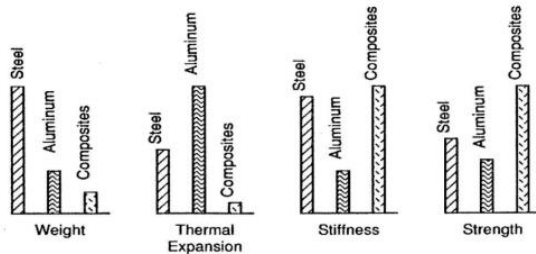


Gambar 2.7 Komposit butir (*particulate composite*)^[8]

Partikel besar yang terdispersi ini memiliki efek penguatan yang rendah tetapi mampu untuk membagi beban yang diterapkan pada komposit, mengakibatkan peningkatan kekakuan dan penurunan keuletan. Partikel keras yang tersebar dalam matriks meningkatkan ketahanan abrasi. Partikel lembut terdispersi dalam matriks yang keras dapat meningkatkan *machinability* dan mengurangi koefisien gesek (timah dalam matriks aluminium atau timbal dalam matriks tembaga).

2.3 Perbandingan Komposit dengan Logam lain.

Gambar 2.8 menunjukkan perbandingan logam seperti baja dan aluminium dengan komposit. Aluminium dan besi dipilih sebagai pembanding karena material tersebut banyak digunakan di dunia industri. Dari perbandingan berat, komposit memiliki berat yang lebih ringan daripada besi dan aluminium. Begitupula perbandingan *thermal expansion* dari komposit yang jauh lebih rendah daripada besi dan aluminium sehingga baik digunakan pada media kerja bertemperatur tinggi. Selain itu, kekuatan dan kekakuan komposit juga lebih rendah dibandingkan dengan logam dan keramik, yaitu sekitar $1,0 - 1,7 \text{ gr/cm}^3$.



Gambar 2.8 Perbandingan komposit dengan logam yang lain ^[10]

2.4 *Polymer Matrix Composite (PMC)*

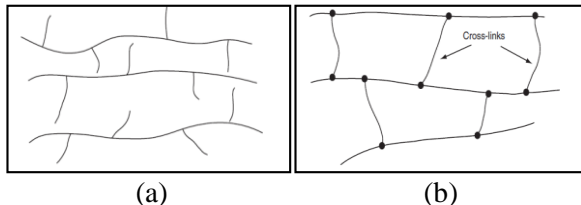
Polimer berasal dari kata “*poly*” yang berarti banyak dan “*mer*” (*meros*) yang berarti bagian, jadi polimer dapat didefinisikan sebagai suatu material yang molekulnya dibentuk dari beberapa bagian (monomer). *Polymer Matrix Composite* merupakan salah satu jenis material komposit dimana material berbahan dasar polimer menjadi matriksnya. Umumnya polimer terbentuk dari hidrokarbon dimana atom karbon (C) sebagai tulang punggung dalam rantai ikatan kimianya. *Polymer Matrix Composite* (PMC) sendiri telah berubah fungsinya setelah perang dunia ke-2 menjadi salah satu material yang sangat diperhitungkan keberadaannya untuk dipergunakan dalam berbagai rekayasa yang berhubungan dengan aplikasi-aplikasi penting bagi umat manusia. *Polymer Matrix Composite* merupakan salah satu jenis material komposit dimana material berbahan dasar polimer menjadi matriksnya. Dalam aplikasi komposit, polimer sebagai matriks banyak disebut orang sebagai resin. Fungsi dari matriks polimer pada PMC adalah untuk meneruskan tegangan dari luar (*external stress*) kepada penguat dan juga berfungsi untuk menahan abrasi yang mungkin terjadi. Berdasarkan sifatnya, polimer dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu :

1. *Thermoplastik* :

Polimer jenis ini dapat diperlunak saat dipanaskan diatas temperatur kritisnya. Polimer thermoplastic ini dapat didaur ulang melalui proses pemanasan. contoh: *Polyvinyl Chloride (PVC)*, *Polyethylene(PE)* dan *Polystyrene*.

2. *Thermosetting* :

Polimer jenis ini akan semakin mengeras saat dipanaskan diatas temperatur kritisnya dan tidak dapat diperlunak dengan cara dipanaskan kembali sehingga tidak bisa dibentuk kembali melalui proses pemanasan. Polimer thermoset tidak dapat didaur ulang. contoh: *Epoxy*, *Polyester*, *phenolic (PF)*.



Gambar 2.9 Ikatan molekul pada polimer (a) *thermoplastic*,
(b) *thermoset* ^[6].

3. *Elastomer* :

Merupakan jenis polimer yang dapat kembali ke bentuk asal setelah tegangan yang diberikan dihilangkan, contoh: karet.

2.5 *Resin Unsaturated Polyester*

Unsaturated Polyester merupakan jenis *thermoset* berbentuk cair. Kebanyakan orang menyebutnya dengan *Polyester*. Resin ini mempunyai viskositas yang relatif rendah dan mengeras pada suhu kamar dengan penggunaan katalis.

Sifat resin ini adalah kaku dan rapuh. Resin *polyester* banyak mengandung stiren sehingga mempunyai suhu deformasi thermal yang lebih rendah dibandingkan dengan resin *thermoset* lainnya dan mampu menahan panas kira-kira 110-140°C dalam waktu yang cukup lama. Mempunyai sifat ketahanan listrik yang baik. Mampu menahan asam dengan cukup baik, namun lemah terhadap alkali. Secara luas digunakan dalam dunia material sebagai bahan komposit.

Penggunaan resin jenis ini dapat dilakukan dari mulai proses yang paling sederhana yaitu proses *hand lay-up* hingga dengan metode manufaktur yang kompleks. Resin jenis ini banyak digunakan dalam aplikasi komposit di dunia industry. Beberapa keunggulan dan kekurangannya ^[11], yaitu:

- Harganya yang relatif murah.
- Waktu *curing* yang cepat.
- Warna jernih.
- Kestabilan dimensional.
- Mudah untuk dibentuk dengan mudah kedalam bentuk yang rumit.
- Sebagai isolator listrik yang baik.
- Tahan terhadap air dan zat kimia.
- Produk dapat dibuat sesuai dengan kebutuhan.
- Kurang tahan terhadap panas sehingga perlu cukup diperhatikan pada penggunaannya.

- Kekerasan permukaan yang kurang dibandingkan logam dan keramik.

Jenis resin *Polyester* yang banyak digunakan adalah BQTN 157. Tipe resin ini tahan terhadap air (suhu normal) dan asam lemah. Tipe jenis ini sangat dikenal dibidang pembuatan kapal di Indonesia. Contoh aplikasinya adalah botol plastic, serta bagian-bagian *body* dari kendaraan bermotor, terutama pada mobil.

Tabel 2.1 Spesifikasi resin Polyester Yukalac BQTN 157 ^[12]

Item	Satuan	Nilai Tipikal	Catatan
Berat jenis	-	1,215	25°C
Kekerasan	-	40	Barcol/GYZJ 934-1
Suhu distorsi panas	°C	70	
Penyerapan air	%	0,188	24 jam
Suhu ruang	%	0,466	7 hari
Kekuatan Fleksural	Kg/mm ²	9,4	-
Modulus Fleksural	Kg/mm ²	300	-
Daya rentang	Kg/mm ²	5,5	-
Modulus rentang	Kg/mm ²	300	-
Elongasi	%	2,1	-

2.6 *Hollow Glass Microsphere (HGM)*

Hollow Glass Microsphere telah banyak digunakan sebagai pengisi yang memiliki densitas rendah untuk berbagai jenis senyawa polimer sejak pertengahan abad 1960-an. *Hollow Glass Microsphere* merupakan kaca berdinding tipis yang berrongga dan terbuat dari kaca yang mengandung *sodium borosilicate*. Selama 20 tahun pertama setelah pengenalan mereka, HGM tidak cukup kuat untuk menahan gaya geser yang tinggi dan tekanan tinggi yang terlibat dalam pembuatan plastik dan *injection molding*.

Pada akhir 1980-an, 3M memperkenalkan microsphere kaca dengan kekuatan isotonic (penggunaan tekanan kekuatan proporsi yang sama dari segala arah) yang mencapai 10.000 psi, lebih dari dua kali kekuatan sebelumnya yang tersedia. Dengan ditemukannya jenis ini berarti bahwa *Hollow Glass Microsphere* dapat digunakan sebagai pengisi dalam proses-proses yang membutuhkan tegangan geser cukup tinggi. ^[13] Pada jenis HGM iM30K, memiliki kekuatan tekan (kompresi) tertinggi di dunia untuk produk tersebut dan juga memiliki rasio *strength-to-density* tertinggi dari jenis HGM di pasar. Menurut ASTM D-1238, HGM dapat menerima temperatur antara *range* 30°C-220°C, serta laju pemanasan yang diterima adalah sebesar 10°C/menit. HGM Terbuat dari bahan soda atau kapur borosilikat (*soda / lime borosilicate*), yang memiliki konduktivitas termal yang rendah, ketahanan terhadap tegangan tekan yang tinggi (3,000-30,000 psi), berat jenis yang rendah (0.3-0.6 g/cc), dan titik leleh yang tinggi (600°C). Karena sifat-sifat material tersebut maka HGM banyak digunakan sebagai filler dalam material komposit ringan seperti busa sintaksis (*syntactic foam*) dan beton ringan.



Gambar 2.10 *Hollow Glass Microsphere* ^[14]

Beberapa keunggulan dari *Hollow Glass Microsphere* yaitu:

- Memiliki ketahanan pada suhu tinggi
- Memiliki rasio *strength-to-density* yang tinggi
- Memiliki stabilitas kimia yang baik
- Memiliki kekuatan tekan yang tinggi
- Memiliki termal konduktivitas yang rendah
- Penyerapan terhadap minyak rendah

Contoh aplikasi lainnya adalah, HGM ditambahkan pada pvc kaku yang memberikan keuntungan stabilitas dimensi yang baik, dan ketahanan terhadap suhu yang tinggi.

Tabel 2.2 Data spesifikasi teknis *Hollow Glass Microsphere*^[13]

Material Description

Property	iM30k
Shape	Hollow spheres with thin walls
Composition	Soda-lime-borosilicate glass
Color, Unaided Eye	White, powder

Physical Properties

Property	iM30k	Test Method
Isostatic Crush Strength (psi)	28,000	3M QCM 14.1.8
True Density (g/cc)	0,60	3M QCM 14.24.1

Packing Factor (bulk density to true particle density)	63%	
Oil Absorption (g oil/100 cc)	33,5	ASTM D282-84 of polymer additive
Softening point (oC)	600	
Flotation (density<1.0 g/cc)	90% (in volume)	3M QCM 37.2
Volatile Content (by weight)	0.5% max	3M QCM 1.5.7
Alkalinity (milliequivalents)	0.5	3M QCM 55.19/gram max
pH (5% loading in water)	9.5	ASTM D3100-1982
Diameter (average)	18 microns	3M QCM 193.0

Pada penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya tahun 2000 oleh ^[15] R. J. Cardoso dan A. Shukla mengenai komposit partikel *polyester* – HGM menunjukkan bahwa modulus young komposit akan meningkat dengan penambahan HGM sebesar 25% dari fraksi berat dibandingkan dengan *polyester* murni. Mereka menggunakan HGM yang dilapisi *Silane coupling agent* dengan tujuan meningkatkan ikatan antara polyester dan HGM. Mereka juga menggunakan katalis MEKP 0,85% dan *accelerator* Cobalt Octoate 0,03% dari volume resin. Komposit kemudian di *post-curing* pada temperatur 52°C selama 4 jam dan dilanjutkan 63°C selama 5 jam dengan tujuan menyempurnakan proses *cross-linking*. Rata-rata ukuran diameter butir HGM juga ikut berpengaruh, modulus young akan meningkat seiring dengan penurunan rata-rata ukuran butir HGM pada fraksi volume yang sama. Hal ini disebabkan pada ukuran diameter butir yang lebih besar maka rongga di dalam HGM juga semakin besar ukurannya

dibandingkan ukuran diameter butir yang lebih kecil sehingga tidak mampu menahan gaya yang lebih besar.

Tabel 2.3 Hasil Modulus Elastisitas dan Poisson ratio pada komposit *Polyester – 25% Hollow Glass Microspheres* ^[15]

Particulate size range (μm)	E (GPa)	Poisson's ratio (ν)
Polyester	3.98	0.35
300-180	4.16 \pm 0.10	0.29 \pm 0.01
150-105	4.31 \pm 0.03	0.30 \pm 0.01
105-10	4.33 \pm 0.02	0.30 \pm 0.01
75-10	4.45 \pm 0.08	0.29 \pm 0.01

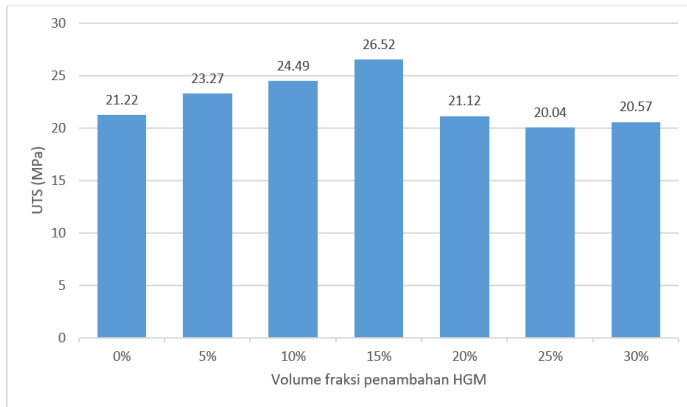
Penelitian oleh ^[16] Daniel Jung pada tahun 1997 menggunakan HGM diameter 10-85 μm dengan rata-rata 20 μm serta perbandingan diameter dalam dan diameter luar (R_i/R_o)=0,97. Resin ditambahkan Dow Corning Silane Z-6070 sebanyak 1% serta menggunakan katalis MEKPO 1%. Kemudian komposit diberikan proses *curing* pada temperatur kamar selama 2 jam dan *post-curing* temperatur 40°C selama 2 hari. Hasil uji tariknya menunjukkan kekuatan tarik meningkat dari 17 MPa menjadi 21 MPa pada penambahan fraksi volume HGM 10%, diatas penambahan 10% nilai kekuatan tarik cenderung terus menurun. Namun seiring dengan penambahan HGM maka nilai modulus Young-nya semakin menurun. Menurut analisa Jung, dengan penambahan Dow Corning Silane z-6070 akan meningkatkan ikatan adhesi antara polyester dan HGM sehingga dapat meningkatkan ikatannya. Nilai modulus elastisitas dapat naik atau turun bergantung dengan penambahan fraksi volume HGM. Karakteristik modulus elastisitas juga dipengaruhi dari ketebalan dinding butir HGM. Butir yang memiliki dinding lebih tipis ($R_i/R_o \rightarrow 1$) menghasilkan modulus elastisitas komposit yang semakin menurun pada penambahan fraksi volume HGM, sebaliknya semakin tebal dinding HGM (R_i/R_o semakin mendekati 0) maka

modulus elastisitasnya akan meningkat seiring dengan penambahan fraksi volume HGM.

Tabel 2.4 Hasil Modulus Young pada komposit *Polyester – Hollow Glass Microspheres* yang didapat dari Pengujian Tarik ^[16]

Volume Fraction	Young's Modulus (GPa)	
	Mean Value	Standard Deviation
0%	3.55	0.17
5%	2.95	0.12
10%	2.89	0.08
18%	2.66	0.08
25%	2.46	0.07
30%	2.08	0.07

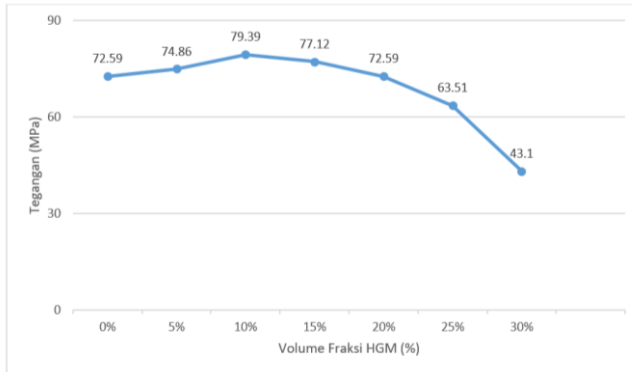
Penelitian yang dilakukan oleh ^[2] Irwan Nugraha Saputra pada tahun 2012 tentang pengaruh penambahan kadar HGM 0 – 30% pada resin polyester. Dari hasil pengujian tarik, didapatkan adanya peningkatan kekuatan tarik komposit polyester - HGM pada beberapa penambahan fraksi volume HGM tertentu yaitu 5%, 10% , 15% jika dibandingkan dengan polyester murni. Kemudian kekuatan tarik menurun pada fraksi volume penambahan HGM 20% dan 25%. Selanjutnya kekuatan tarik naik kembali pada 30%.



Gambar 2.11 Kekuatan tarik meningkat pada spesimen dengan penambahan fraksi volume HGM 15% [2].

Dari gambar 2.11 didapatkan tegangan tarik tertinggi yaitu 26,52 MPa pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 15%. Sedangkan tegangan tarik terendah ditemukan pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 25%, dengan nilai tegangan tarik sebesar 20,049 MPa. Pada polyester murni tegangan tariknya adalah 21,22 MPa.

Penelitian serupa juga pernah dilakukan oleh [3] Kevin Yoga Pradana pada tahun 2012 mengenai pengaruh variasi fraksi Volume terhadap karakteristik bending komposit polyester – Partikel Hollow Glass Microspheres. Penelitian dilakukan dengan mencampurkan polyester dengan HGM. Dimensi spesimen uji bending dibuat sesuai standart pengujian bending ASTM D 790M-84a dengan variasi fraksi volume HGM 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30%. Material kemudian di curing pada temperatur kamar ($\pm 27^{\circ}\text{C}$) selama 24 jam. Masing – masing spesimen dari variasi volume fraksi akan diambil 3 sampel untuk diuji bending dan kemudian dirata - rata untuk mendapatkan komposit dengan hasil fraksi volume HGM yang menghasilkan tegangan bending maksimum.



Gambar 2.12 Tegangan bending maksimum didapatkan dari penambahan fraksi volume HGM 10%. ^[3]

Hasil yang didapatkan adalah penambahan fraksi volume HGM pada polyester berpengaruh terhadap peningkatan tegangan bending dan modulus elasisitas komposit. Tegangan bending maksimum komposit didapatkan dari penambahan fraksi volume HGM sebesar 10%. Sedangkan tegangan bending terendah komposit ditemukan pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 30%, dengan nilai tegangan bending sebesar 43,10 MPa. Pada polyester murni tegangan bendingnya adalah 72,59 MPa. Dari gambar 2.12 dapat dilihat bahwa nilai tegangan bending yang didapatkan semakin besar seiring dengan penambahan fraksi volume HGM sebesar 10%.

2.7 Aditif

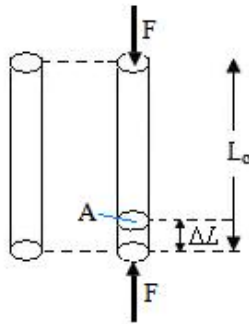
Penggunaan polimer dalam komposit memerlukan material lain yang mempunyai fungsi khusus yang disebut aditif. Material tambahan tersebut dapat dikelompokkan menjadi 3 jenis, yaitu:

1. *Catalyst, stabilizer, coupling agent* merupakan senyawa kimia yang digunakan untuk mempercepat, menstabilkan dan membantu perekatan polimer dengan fasa penguat komposit.

2. *Pigments* digunakan untuk memberi tekstur dan warna pada polimer.
3. *Release agents, lubricants*, merupakan material yang ditambahkan untuk mempermudah dalam melepaskan komposit dari cetakannya dalam proses produksi komposit.

2.8 Pengujian Tekan

Pengujian tekan adalah salah satu bentuk pengujian merusak (*destructive test*) yang dilakukan terhadap suatu material untuk mengetahui karakteristik mekanik dari material tersebut. Uji tekan merupakan pengujian yang berkebalikan dengan uji tarik, jika pada tegangan tarik, arah kedua gaya menjauhi ujung benda (kedua gaya saling berjauhan), maka pada tegangan tekan, arah kedua gaya saling mendekati. Dengan kata lain benda tidak ditarik tetapi ditekan (gaya-gaya bekerja di dalam benda). Kekuatan tekan material adalah nilai tegangan tekan uniaksial yang mempunyai modulus kegagalan ketika saat pengujian^[17]. Perubahan bentuk benda yang disebabkan oleh tegangan tekan dinamakan mampatan. Misalnya pada tiang-tiang yang menopang beban, seperti tiang bangunan mengalami tegangan tekan. Kekuatan tekan dapat diperoleh dari percobaan dengan alat pengujian tekan. Ketika dalam pengujian nantinya, spesimen (biasanya silinder) akan menjadi lebih mengecil seperti menyebar lateral. Perubahan benda yang disebabkan tegangan tekan dapat dilihat pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Perubahan benda yang disebabkan oleh tegangan tekan aksial ^[17]

Keterangan :

A = Luas Penampang

F = Gaya yang bekerja sebagai penekanan

L0 = Panjang Awal

ΔL = Perubahan panjang, dimana : $\Delta L = L_0 - L_1$

Tegangan normal tersebut akibat beban tekan statik dapat ditentukan berdasarkan persamaan:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Dimana,

σ = Tegangan normal akibat beban tekan statik (N/m²)

F = Beban tekan (N)

A = Luas penampang spesimen (Dalam perancangan teknik yang sebenarnya sebagian besar kita bertumpu pada tegangan teknik. Pada kenyataannya, tegangan sebenarnya berbeda dengan tegangan teknik. Oleh sebab itu, material akibat beban tekan dapat dihitung dari penjelasan

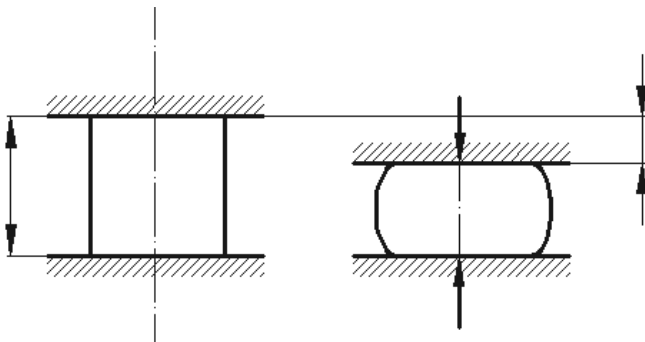
persamaan yang diberikan. Hal ini tentu saja karena perubahan luas penampang (A_0) dan fungsi dari luas penampang $A = \phi(F)$ seperti gambar 2.14.

Regangan akibat beban tekan statik dapat ditentukan berdasarkan persamaan:

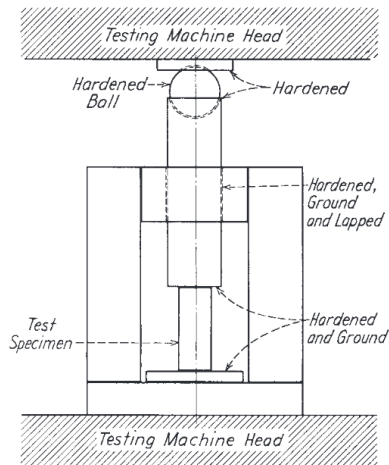
$$\epsilon = \frac{L_i - L_o}{L_o} \quad (2.2)$$

Dimana :

- E = Regangan akibat beban tekan static
- L_i = Perubahan panjang akibat beban tekan (mm)
- L_o = Panjang spesimen mula-mula (mm)



Gambar 2.14 Bentuk spesimen saat uji tekan^[17]



Gambar 2.15 Alat uji tekan (*Compression Tool*) ^[18].

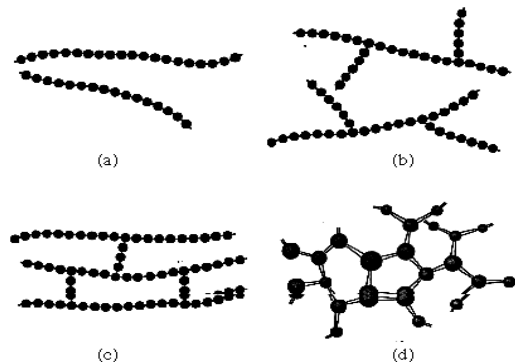
Pada prakteknya nilai hasil pengukuran tegangan pada suatu pengujian tarik dan tekan pada umumnya merupakan nilai teknik. Regangan akibat beban tekan yang terjadi, panjang akan menjadi berkurang dan diameter pada spesimen akan menjadi besar, maka ini akan terjadi deformasi plastis.

Nilai ketangguhan/*toughness* didapat dari pendekatan kurva tegangan regangan dengan mencari luasan dibawah kurva. Sedangkan untuk metode pengujian tekan berdasarkan sesuai standar ASTM D 695 ^[18].

2.9 Proses Curing

Secara umum inti dari mekanisme curing material thermoset adalah bagaimana proses crosslink dapat terjadi. Reaksi crosslink pada *unsaturated* polyester diharapkan terjadi saat campuran resin

dan penguat telah dimasukkan dalam cetakan. Pada aplikasinya curing (*crosslinking*) dapat terjadi pada temperatur tinggi (100°C) seperti pada proses *pressure molding* atau pada temperatur ruang pada saat *hand lay-up*. Pada proses curing, yang terjadi adalah molekul yang berukuran sedang saling berikatan membentuk ikatan molekul yang lebih besar. Hasilnya material yang telah mengalami proses curing menjadi lebih padat dan meningkatkan kekuatan, kekauan, dan kekerasan. Material ini tidak dapat dilelehkan kembali. Agar curing dapat terjadi maka *unsaturated polyester* harus ditambahkan katalis.



Gambar 2.16 Tipe rantai polimer (a) *Linear* (b) *Branched*
(c) *Cross-linked* (d) *network* ^[1]

Katalis ini sendiri berfungsi sebagai pengeras (*hardener*). Untuk proses pada temperatur tinggi biasanya sering digunakan katalis benzoil peroksida, biasanya dalam bentuk pasta peroksida (<50%) yang terlarut pada larutan cair seperti dimetil phthalate. Sedangkan untuk proses pada temperatur ruang biasanya ditambahkan senyawa metil etil keton peroksida (MEKPO). MEKPO adalah campuran dari berbagai senyawa yang biasanya tersedia dalam bentuk 60% peroksida cair yang dicampurkan kedalam dimetil padat. Peroksida dapat menghubungkan ikatan karbon dengan ikatan ganda untuk menghubungkan ikatan dengan

salah satu karbon dan lainnya membentuk ikatan bebas radikal. Ikatan bebas radikal ini sangat reaktif dan secara langsung akan mencari ikatan dengan material lain, contohnya ikatan polyester lainnya. Karena pada tiap ikatan ini membentuk ikatan bebas radikal maka akan membentuk ikatan rantai reaktif dan dapat terhubung dengan rantai lain. Proses ini disebut *crosslink*. Dalam praktiknya, hanya dibutuhkan sedikit peroksida yang dibutuhkan untuk memulai reaksi, sekitar 1% dari berat bersih resin total. Pada saat bereaksi akan timbul panas akibat ikatan yang saling terbentuk. Panas ini dapat membantu memaksimalkan proses sehingga dapat meningkatkan sifat mekaniknya.

2.10 Proses Post-Curing

Pada penjelasan proses *curing* disebutkan bahwa panas yang timbul akibat proses ikatan yang terbentuk dapat membantu meningkatkan sifat mekaniknya. Namun jarang terjadi proses *curing* yang sempurna pada temperatur kamar. Proses *curing* yang sempurna dapat terjadi pada temperatur tinggi. Seiring dengan meningkatnya temperatur, maka aktivitas molekul dan polimerisasi juga meningkat sehingga derajat kristalinitas akan meningkat. Dengan meningkatnya derajat kristalinitas maka karakteristik mekanikalnya akan berubah dari elastis menjadi kaku dan getas. Polimerisasi merupakan suatu jenis reaksi kimia dimana monomer-monomer bereaksi untuk membentuk rantai yang besar.

Proses *curing* dilakukan dengan cara memanaskan materiil benda uji tersebut pada temperatur tertentu. Namun apabila dipanaskan melebihi T_g (*glass transition temperature*) akan menyebabkan material tersebut menjadi ulet dan jika temperatur tersebut ditingkatkan lagi material akan menjadi leleh dan mencair. Pada waktu dilakukan *post-curing*, material mencapai T_g dimana pada kondisi ini molekul-molekul material menerima lebih banyak

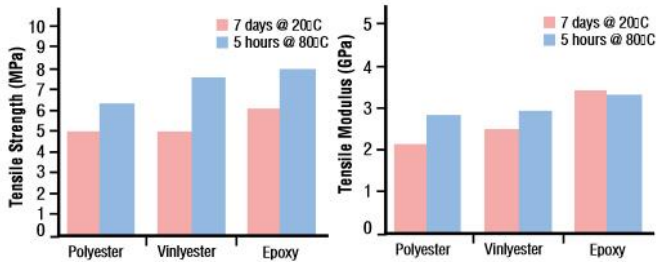
energy dan meningkatkan pergerakan molekul-molekul tersebut. Molekul-molekul tersebut tersusun ulang, mudah untuk meregang dan membentuk ikatan *crosslink*. Hal ini menyebabkan material menjadi lebih fleksibel. Ketika material tersebut didinginkan maka mobilitas dari molekul akan turun kembali dan menyebabkan material menjadi kaku kembali. Fenomena ini menyebabkan material mengalami peningkatan tegangan bending.

Tabel 2.5 Data *glass transition temperature* (T_g) dari *polyester* resin menurut jurnal “*Characterization and Failure Analysis of Plastics*” oleh ASM International diterbitkan pada Desember 2003 pada halaman 117 ^[19].

Thermoset resins				
Amino resins (melamine-formaldehyde)	None(b)	None(b)	...	...
Bismaleimide	230–345(c)	450–650(c)	...	...
Epoxy resins	60–175	140–350	...	...
Phenolic resins	300	570	...	...
Polyester resins	110	230	...	...
Polyimide resins	315–370(c)	600–700(c)	...	...
Polyurethane (cast)	135	275	...	...
Polyurethane (elastomer)	...	...	...	...
Silicone	–125	–193	...	...
Urethane rigid foam	...	...	...	...

(a) Polymer is generally 95% or more noncrystalline. Any T_m given is for remaining crystalline portion or for crystalline version. (b) $T_d = 500\text{ }^\circ\text{C}$ (930 $^\circ\text{F}$). R contains at least one aromatic ring. (c) Based on private communication, American Cyanamid Co. (d) Dry. Source: Ref 1–3 and product information sheets

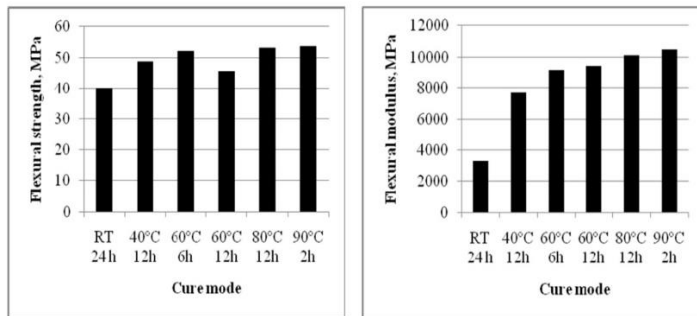
Dari sumber pada tabel 2.5 dapat diketahui bahwa T_g polyester resin adalah 110°C atau sekitar 230°F . Menurut penelitian yang pernah dilakukan oleh perusahaan SP systems^[21], dimana membandingkan antara resin *polyester*, *vinylester*, dan *epoxy* dengan komposisi 100 % tanpa campuran yang di-*curing* pada suhu kamar dan *post-curing* pada temperatur 80°C selama 5 jam yang kemudian diuji dengan pengujian tarik menunjukkan hasil seperti pada gambar 2.17 sebagai berikut :



Gambar 2.17 Grafik Hasil Uji Tarik dan Modulus *Tensile* Antar Resin *Polyester*, *Vinylester*, dan *Epoxy* yang Di-curing dan *Post-curing* ^[21].

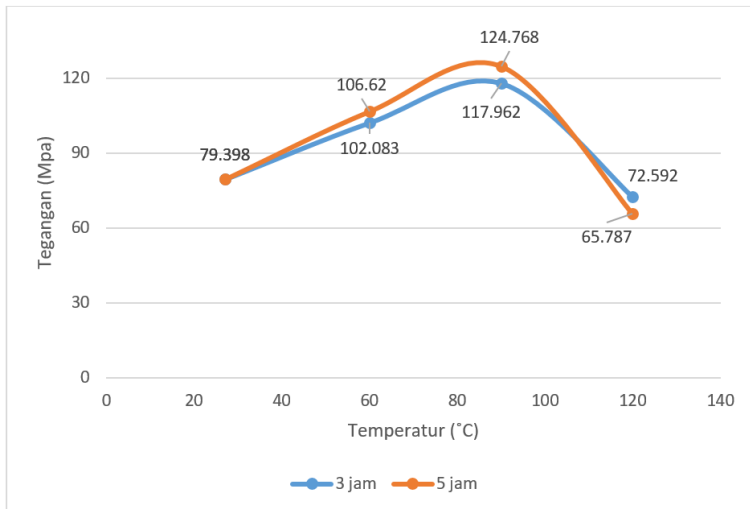
Post-curing pada temperatur transisi (T_g) yang tinggi akan mempengaruhi kualitas dari *crosslink* pada komposit. Waktu penahanan *post-curing* hanya akan berpengaruh pada temperatur transisi (T_g) yang rendah dikarenakan pergerakan rantai polimer tidak bisa secepat saat *post-curing* pada temperatur yang tinggi. Jika temperature tidak melebihi temperature transisi (T_g) dari resin polyester (110°C). Ini disebabkan karena pergerakan rantai polimer tidak bisa cepat jika temperature yang digunakan melebihi T_g . Sehingga sangat berpengaruh pada kekakuan dan kegetasan material yang dapat dilihat dari nilai modulus elastisitasnya ^[23].

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Aare Arunitt, Jaan Kers, Andres Krumme, dan Kaspar Tall ^[22] mengenai pengaruh parameter *post-curing* pada *particle reinforced composite* menggunakan resin polyester, didapatkan hasil bahwa nilai tegangan bending mengalami perubahan pada *post-curing* di temperatur 60°C dengan waktu penahanan selama 6 jam, temperature 80°C dengan waktu penahanan 12 jam dan tegangan bending maksimal didapat pada temperature 90°C dengan waktu penahanan 2 jam. Nilai modulus elastisitas semakin meningkat seiring dengan peningkatan temperatur *post-curing*. Data dari penelitian ini ditunjukkan pada gambar 2.18 sebagai berikut:



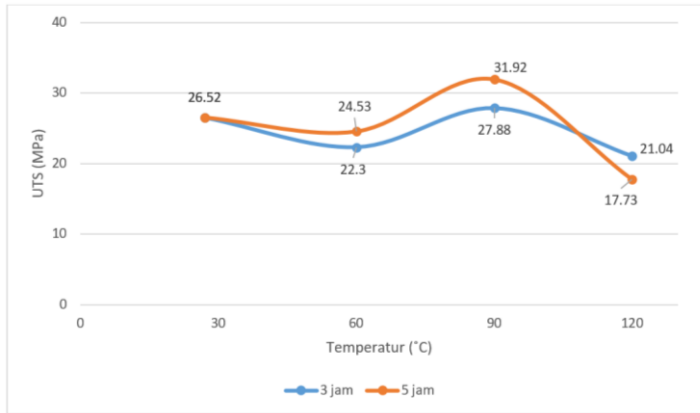
Gambar 2.18 Grafik Nilai Tegangan Bending dan Modulus Elastisitas Komposit Pada Beberapa Perlakuan *Post-Curing* ^[22].

Pada percobaan yang dilakukan oleh ^[3] Kevin Yoga yaitu spesimen di curing pada temperature 27°C / suhu kamar selama 24 jam kemudian di *post-curing* pada variasi temperature 60°C, 90°C, dan 120 °C. Kemudian fenomena yang terjadi adalah penurunan nilai tegangan bending yang dapat diterima spesimen komposit, hal ini dikarenakan *post-curing* pada temperature 120°C telah melewati Tg dari polyester resin sehingga dimungkinkan polyester resin telah mengalami kerusakan karena proses curing telah melewati batas Tg-nya yaitu 110°C. Dikaitkan dengan hasil pengujian maka tampak sesuai, karena pada suhu curing 27°C dan *post-curing* 60°C dengan waktu penahanan 3 jam nilai tegangan bending adalah 102,083 MPa. Untuk waktu penahanan 5 jam, nilai tegangan bending sebesar 106.62 MPa. Semakin tinggi temperature *post-curing* yang diberikan, dan semakin lama waktu penahanan yang diberikan (5 jam) tampak nilai tegangan bending mengalami kenaikan yaitu 124,768 Mpa pada suhu curing temperature kamar (27°C) dan *post-curing* 90°C selama 5 jam. Sedangkan pada suhu curing 27°C, *post-curing* 120°C dengan waktu penahanan selama 5 jam nilai tegangan bending adalah 65,787 MPa. Spesimen ini mengalami penurunan kekuatan bending yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan karena temperature *post-curing* yang diberikan pada spesimen telah melewati batas Tg dari polyester.



Gambar 2.19 Tegangan bending maksimum ketika spesimen ditahan pada temperatur 90°C selama 5 jam^[3]

Dari penelitian yang pernah dilakukan oleh Irwan Nugraha Saputra^[2]. Dimana membandingkan perlakuan temperature *post-curing* pada resin unsaturated polyester BQTN 157 dengan variasi fraksi volume penambahan HGM anantara 0%-30%. Material ini kemudian diberi perlakuan dua tahap curing yaitu curing suhu kamar selama 1 hari kemudian *post-curing* di dalam oven konvensional. Variasi temperatur yang dilakukan adalah 60°C, 90°C, dan 110°C. Masing-masing temperatur *post-curing* ditahan selama 3 dan 5 jam. Setelah mengalami variasi temperature *post-curing*, spesimen kemudian diuji dengan pengujian tarik dengan menunjukkan hasil sebagai berikut.



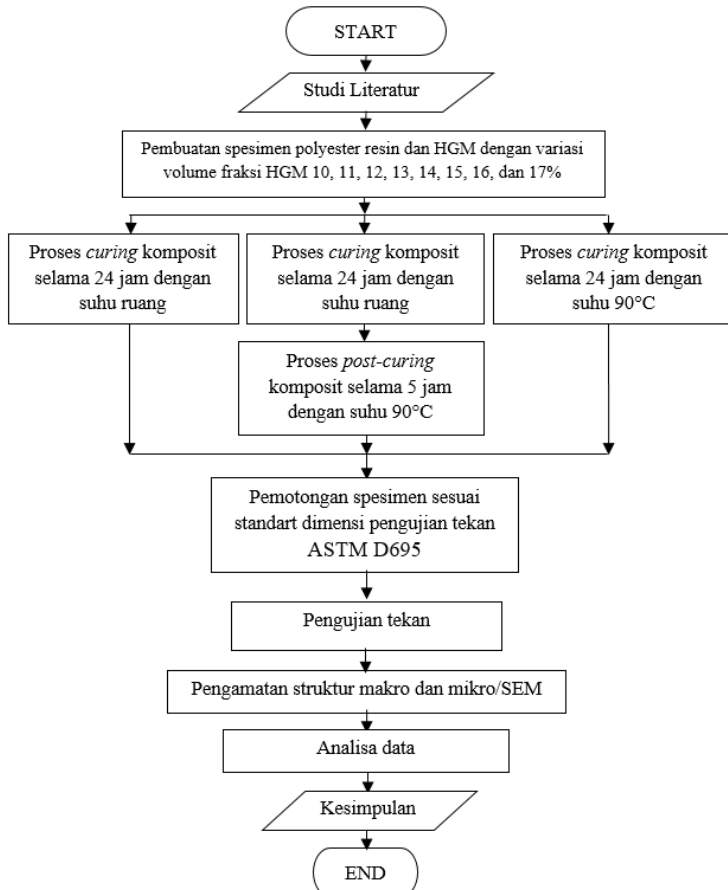
Gambar 2.20 Kekuatan tarik maksimum ketika spesimen ditahan pada temperatur 90°C selama 5 jam^[2]

Dari hasil pengujian tarik pada gambar 2.20, didapatkan adanya penurunan kekuatan tarik komposit polyester-HGM yang diberi perlakuan *post-curing* pada temperatur 60°C dengan waktu penahanan 3 dan 5 jam. Namun komposit yang diberi perlakuan *post-curing* pada temperatur 90°C menunjukkan kenaikan kekuatan tarik. Kekuatan tarik optimal yaitu 31,92 MPa didapat pada komposit dengan *post-curing* 90°C dengan waktu penahanan selama 5 jam. Pada komposit dengan *post-curing* 110°C (setelah melebihi titik T_g) dengan waktu penahanan 5 jam memiliki kekuatan tarik (17,73 MPa) yang lebih rendah daripada dengan waktu penahanan 3 jam (21,04 MPa). Hal ini terjadi karena sifat fisik material mulai berubah menjadi fase *viscous liquid* yang lebih ulet. Sehingga semakin lama di dalam oven maka kekuatannya semakin menurun setelah melewati titik T_g .

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Skema diagram alir penelitian.

3.2 Persiapan Spesimen

3.2.1 Perhitungan Spesimen

- Diketahui:
 - Perbandingan fraksi volume:
 $\%V_{polyester} : \%V_{HGM} =$
 - 1) 9 : 1
 - 2) 8,9 : 1,1
 - 3) 8,8 : 1,2
 - 4) 8,7 : 1,3
 - 5) 8,6 : 1,4
 - 6) 8,5 : 1,5
 - 7) 8,4 : 1,6
 - 8) 8,3 : 1,7
 - Data Spesimen:
Panjang = 43,7 mm;
Diameter = 21,5 mm;
jari-jari = 10,75 mm
 $\rho_{hgm} = 0,6 \text{ gr/cm}^3$
 $\rho_{polyester} = 1,3 \text{ gr/cm}^3$
- Contoh perhitungan menggunakan fraksi volume HGM 10%.
 - Menghitung volume komposit pada spesimen
$$V_{komposit} = \pi \times r^2 \times t$$
$$= 3,14 \times (10,75)^2 \text{ mm} \times 43,7 \text{ mm}$$
$$= 15857,25 \text{ mm}^3 = 15,85 \text{ cm}^3$$
 - Menghitung volume HGM
$$V_{HGM} = \%V_{HGM} \times V_{komposit}$$
$$= 10\% \times 15,85 \text{ cm}^3 = 1,59 \text{ cm}^3$$
 - Menghitung berat HGM

$$\begin{aligned}
 m_{HGM} &= \rho_{HGM} \times V_{HGM} \\
 &= 0,6 \times 1,59 \text{ cm}^3 \\
 &= 0,95 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

- Menghitung volume Polyester

$$\begin{aligned}
 V_{Polyester} &= \%V_{Polyester} \times V_{Komposit} \\
 &= 90\% \times 15,85 \text{ cm}^3 \\
 &= 14,27 \text{ cm}^3 \\
 &= 14,27 \text{ ml}
 \end{aligned}$$

- Menghitung berat polyester

$$\begin{aligned}
 m_{polyester} &= \rho_{polyester} \times V_{Polyester} \\
 &= 1,18 \times 14,27 \text{ cm}^3 \\
 &= 16,84 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

- Menghitung berat total komposit

$$\begin{aligned}
 m_{total} &= m_{HGM} + m_{polyester} \\
 &= 0,95 + 16,84 \text{ gr} \\
 &= 17,79 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

- Menghitung density (teori)

$$\begin{aligned}
 Density_{komposit} &= \frac{m_{total}}{V_{komposit}} \\
 &= \frac{17,79 \text{ gr}}{15,85 \text{ cm}^3} \\
 &= 1,122 \text{ gr/cm}^3
 \end{aligned}$$

3.2.3 Tabel Perhitungan Volume HGM dan Volume Resin Polyester

Tabel 3.1 Perbandingan fraksi volume yang digunakan

HGM (%)	Polyester (%)	Vol. HGM (cm ³)	Vol. Polyester (cm ³ /ml)
10%	90%	1.59	14.27
11%	89%	1.74	14.11
12%	88%	1.90	13.95
13%	87%	2.06	13.80
14%	86%	2.22	13.64
15%	85%	2.38	13.48
16%	84%	2.54	13.32
17%	83%	2.70	13.16

3.2.4 Tabel perhitungan Berat HGM, Berat Polyester dan Densitas

Tabel 3.2 Perhitungan berat dan densitas

HGM (%)	Polyester (%)	Berat HGM (gr)	Berat Polyester (gr)	Berat Total (gr)	Densitas (gr/cm ³)
10%	90%	0.951	16.840	17.791	1.1220
11%	89%	1.046	16.653	17.699	1.1162
12%	88%	1.141	16.466	17.607	1.1104
13%	87%	1.236	16.279	17.515	1.1046
14%	86%	1.332	16.091	17.423	1.0988
15%	85%	1.427	15.904	17.331	1.0930
16%	84%	1.522	15.717	17.240	1.0872
17%	83%	1.617	15.530	17.178	1.0814

3.3 Material Bahan

Material komposit akan dibuat dengan mencampurkan *Hollow Glass Microspheres*, resin polyester, dan ditambahkan katalis yang kemudian dituang ke dalam cetakan dan ditunggu hingga benar-benar mengeras. Proses pencampuran adonan HGM dan resin polyester dengan katalis harus cepat agar campuran tidak segera kering dan mengeras. Variasi fraksi volume HGM yang digunakan adalah 10%, 11%, 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, dan 17%. Berikut bahan-bahan yang digunakan untuk membuat komposit:

1. Resin *unsaturated Polyester* jenis Yukalac 157.



Gambar 3.2 Resin Polyester Yukalac 157.

2. *Hollow Glass Microspheres* jenis iM30K



Gambar 3.3 HGM jenis iM30K.

3. Katalis jenis metil etil keton peroksida (MEKPO)



Gambar 3.4 Katalis MEKPO

4. Wax, berfungsi sebagai lapisan yang akan mempermudah proses pelepasan spesimen dari cetakan.



Gambar 3.5 Wax

3.4 Peralatan yang digunakan

1. Cetakan silinder sebagai cetakan spesimen.



Gambar 3.6 Cetakan Pipa PVC

2. *Furnace* digunakan untuk proses *curing* pada suhu 90°C ini adalah furnace milik Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya.



Gambar 3.7 *Heater* konvensional

3. Thermometer untuk mengukur suhu furnace.



Gambar 3.8 Thermometer

4. Mesin uji tekan yang digunakan adalah universal testing machine Shimadzu Corp milik jurusan Teknik Sipil ITS Surabaya.



Gambar 3.9 Mesin uji Tekan Universal Testing Machine Shimadzu Corp

5. *Scanning Electron Microscope* Zeiss EVO MA 10



Gambar 3.10 *Scanning Electron Microscope* Zeiss EVO MA 10

6. Alat bantu : gelas plastik, gerinda tangan, sendok pengaduk, pipet dan lakban kertas.
7. Alat ukur : timbangan digital, jangka sorong, gelas ukur.



Gambar 3.11 Timbangan Digital

8. Alat keselamatan : sarung tangan dan masker.

3.5 Variabel Penelitian

Variabel penelitian pada pembuatan material komposit campuran antara resin *polyester* 157 dengan *Hollow Glass Microspheres* (HGM) adalah variasi fraksi volume penambahan HGM, temperatur dan waktu *curing - post-curing*. Masing-masing dari variasi temperatur dan waktu penahanan *post-curing* akan diambil 3 sample untuk diuji dan kemudian dirata-rata. Kemudian dari hasil pengujian akan didapatkan fraksi volume yang optimal. Variasi fraksi volume HGM dan resin *polyester* untuk *curing* temperature ruang (27°C) 24 jam ditunjukkan pada tabel 3.3. Variasi fraksi volume HGM dan *polyester* untuk *curing* temperature 27°C selama 24 jam kemudian *post-curing* 90°C selama 5 jam ditunjukkan pada tabel 3.4. Dan variasi fraksi volume HGM dan *polyester* untuk *curing* temperature 90°C selama 24 jam ditunjukkan pada tabel 3.5.

Tabel 3.3 Variasi fraksi volume HGM dan *polyester* untuk *curing* temperature 27°C (temperatur ruang) selama 24 jam.

Kode spesimen	Fraksi Volume HGM (%)	Vol HGM (cm ³)	Vol Polyester (ml)	Berat HGM (gr)	Temperature <i>curing</i> (°C), waktu penahanan (jam)
A10	10	1.59	14.27	0.97	27, 24
A11	11	1.74	14.11	1.06	
A12	12	1.90	13.95	1.16	
A13	13	2.06	13.80	1.26	
A14	14	2.22	13.64	1.35	
A15	15	2.38	13.48	1.45	
A16	16	2.54	13.32	1.55	
A17	17	2.70	13.16	1.64	

Kode A = untuk spesimen yang di-*curing* pada temperature 27°C selama 24 jam.

Tabel 3.4 Variasi fraksi volume HGM dan *polyester* untuk *curing* temperature 27°C selama 24 jam kemudian *post-curing* 90°C selama 5 jam.

Kode spesimen	Fraksi volume HGM (%)	Vol HGM (ml)	Vol Polyester (ml)	Berat HGM (gr)	Temperature <i>curing</i> (°C), waktu penahanan (jam)	Temperature <i>post-curing</i> (°C), waktu penahanan (jam)
B10	10	1.59	14.27	0.97	27, 24	90, 5
B11	11	1.74	14.11	1.06		
B12	12	1.90	13.95	1.16		
B13	13	2.06	13.80	1.26		
B14	14	2.22	13.64	1.35		
B15	15	2.38	13.48	1.45		
B16	16	2.54	13.32	1.55		
B17	17	2.70	13.16	1.64		

Kode B = untuk spesimen yang di-*curing* pada temperature 27°C (temperature ruang) selama 24 jam. Lalu *post-curing* 90°C (Heater Konvensional) selama 5 jam.

Tabel 3.5 Variasi fraksi volume HGM dan *polyester* untuk *curing* temperature 90°C selama 24 jam.

Kode spesimen	Fraksi volume HGM (%)	Vol HGM (ml)	Vol Polyester (ml)	Berat HGM (gr)	Temperature <i>curing</i> (°C), waktu penahanan (jam)
C10	10	1.59	14.27	0.97	90, 24 jam
C11	11	1.74	14.11	1.06	
C12	12	1.90	13.95	1.16	
C13	13	2.06	13.80	1.26	
C14	14	2.22	13.64	1.35	
C15	15	2.38	13.48	1.45	
C16	16	2.54	13.32	1.55	
C17	17	2.70	13.16	1.64	

Kode C = untuk spesimen yang di-*curing* pada temperature 90°C (Heater Konvensional) selama 24 jam.

3.6 Langkah-langkah Percobaan

3.6.1 Pembentukan Komposit

Penelitian ini menggunakan matriks *Polyester* resin dengan penguat *Hollow Glass Microsphere* jenis iM30K.

Proses pembuatan komposit sebagai berikut:

1. Memotong pipa paralon (silinder) berdiameter 2.15 cm, dengan panjang masing-masing adalah 4.4 cm sebagai media cetakan spesimen komposit.
2. Sebelum proses pencetakan, cetakan dibersihkan dan dilapisi dengan wax secara merata, hal ini bertujuan agar komposit mudah dilepas dari cetakan nantinya. Spesimen dibuat sesuai dengan variasi seperti pada tabel 3.3, 3.4, dan 3.5. Bagian bawah cetakan ditutup dengan lakban kertas agar tidak terjadi kebocoran.
3. *Polyester* dan HGM diukur sesuai dengan perbandingan volume variasi pada tabel 3.3, 3.4, dan 3.5. *Polyester* dan HGM yang telah diukur sebelumnya di masukkan kedalam gelas plastik. Kemudian campuran *polyester* - HGM diaduk hingga merata selama kurang lebih 15 menit agar campuran merata serta bertujuan untuk mengurangi porositas pada hasil komposit tersebut. Selanjutnya ditambahkan *hardener* dengan perbandingan 1 % dari volume resin polyester (\pm sebanyak 18 tetes dengan menggunakan pipet). Kemudian diaduk kembali agar *hardener* tercampur rata.
4. Campuran dituang ke dalam cetakan.
5. Variasi yang menggunakan temperatur tinggi langsung dimasukan kedalam oven konvensional dengan suhu 90°C dan dibiarkan selama 5 jam dan untuk variasi menggunakan

temperatur ruang dibiarkan dalam cetakan untuk menjalani proses *curing* selama 24 jam pada temperatur kamar (27°C).

6. Setelah 5 jam oven dimatikan dan spesimen komposit dibiarkan di dalam oven hingga temperatur oven turun sampai temperatur ruang.
7. Variasi dengan kode spesimen B setelah menjalani proses *curing* selama 24 jam pada temperatur kamar, selanjutnya dilakukan proses *post-curing* pada oven konvensional selama 5 jam dengan suhu 90°C.
8. Komposit dilepas dari cetakan dengan hati-hati.

3.6.2 Pengamatan bentuk fisik komposit

Setelah proses *curing* dan *post-curing*, komposit diamati apakah terdapat cacat pada komposit. Apabila terdapat cacat pada komposit seperti retak atau terjadi porositas pada permukaan, maka komposit tersebut tidak dapat digunakan dan proses pembentukannya harus diulang dari awal.

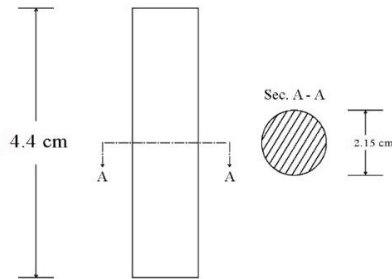
3.6.3 Pembentukan Spesimen

Setelah komposit dinyatakan layak, maka komposit dibentuk menjadi spesimen. Spesimen dibentuk dengan menggunakan alat bantu gerinda tangan sesuai dengan standart pengujian ASTM D695. Proses pembentukan harus dilakukan dengan hati-hati, agar komposit tidak pecah selama proses pembentukan menjadi spesimen.

3.7 Pelaksanaan Uji Spesimen

3.7.1 Pengujian tekan

Spesimen uji tekan pada penelitian ini dibentuk berdasarkan standar uji tekan komposit yaitu ^[18] ASTM D695, “*Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*”. Bentuk serta dimensi dari spesimen uji tekan adalah seperti gambar 3.13. Mesin uji tekan yang digunakan adalah universal testing machine Shimadzu Corp milik jurusan Teknik Sipil ITS Surabaya.



Gambar 3.12 Dimensi spesimen uji tekan.

3.7.2 Prosedur uji tekan

Prosedur pengujian tekan adalah sebagai berikut:

1. Masing-masing spesimen diberi label sesuai variabel yang digunakan.
2. Pencatatan dimensi awal dari spesimen, yaitu : Panjang awal (L_0) dan diameter (d).
3. Memasang spesimen pada bagian atas mesin yang digunakan untuk pengujian tekan.
4. Pembebanan pada spesimen hingga pecah.
5. Mencatat data *Ultimate compressive strength*
6. Setelah pecah, spesimen diambil.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

DATA HASIL PENELITIAN

4.1 Data Hasil Pengujian Tekan Komposit

Pengujian tekan dilakukan dengan mesin uji tekan *universal testing machine Shimadzu Corp.* milik lab. beton dan struktur jurusan Teknik Sipil ITS, berdasarkan pada standar dimensi dan pengujian komposit ASTM D695 (*Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*). Hasil pengujian tekan pada komposit ditampilkan pada tabel berikut :

Tabel 4.1 Hasil uji tekan komposit *curing* temperatur 27°C selama 24 jam.

Material	F (N)	<i>Ultimate Compressive Strength</i> (MPa)		<i>Toughness</i> (J/mm ³)	
		Hasil	Rata-rata	Hasil	Rata-rata
A10	20921.9	66.63	66.20	10.76	11.87
	20812.5	66.28		14.34	
	20625	65.68		10.50	
A11	21109.4	67.22	67.01	12.04	13.51
	21031.2	66.97		15.64	
	20984.4	66.82		12.86	
A12	21406.2	68.17	67.66	15.29	13.68
	21203.2	67.52		13.67	
	21125	67.27		12.09	
A13	21937.5	69.86	69.58	11.59	13.58
	21812.5	69.46		14.97	
	21796.8	69.41		14.18	
A14	22640.6	72.10	70.71	14.33	13.92
	21984.4	70.01		14.32	
	21984.4	70.01		13.12	
A15	22640.6	72.10	71.37	15.60	14.17
	22109.4	70.41		14.96	
	22484.4	71.60		11.94	
A16	23781.2	75.73	74.51	17.28	14.97
	23656.3	75.33		11.63	
	22750	72.45		15.99	
A17	23062.5	73.44	73.99	13.22	13.65
	23062.5	73.39		15.93	
	23593.7	75.14		11.79	

Tabel 4.2 Hasil uji tekan komposit *curing* temperatur 27°C selama 24 jam lalu *post-curing* temperatur 90°C selama 5 jam.

Material	F (N)	<i>Ultimate Compressive Strength</i> (MPa)		<i>Toughness</i> (J/mm ³)	
		Hasil	Rata-rata	Hasil	Rata-rata
B10	27218.7	87.26	89.23	11.28	12.26
	28500	90.76		14.64	
	28062.5	89.67		10.86	
B11	27953.1	89.02	89.79	13.59	12.74
	28218.7	90.31		12.88	
	28218.7	90.96		11.74	
B12	29171.8	92.9	92.24	13.72	13.07
	29156.2	92.85		12.1	
	28562.5	90.96		13.4	
B13	29546.8	95.04	94.35	13.75	13.51
	29546.8	94.09		12.81	
	29484.4	93.89		13.97	
B14	29750	94.74	94.61	18.02	14.00
	29609.4	94.93		12.65	
	29562.5	94.14		11.32	
B15	30500	97.46	97.22	10.19	11.55
	30328.1	96.58		13.6	
	30546.8	97.61		10.86	
B16	30687.5	97.73	98.39	10.55	10.89
	30750	98.42		11.48	
	31093.7	99.02		10.63	
B17	30953.1	98.58	98.76	10.99	10.80
	30609.4	99.13		11.6	
	30953.1	98.58		9.82	

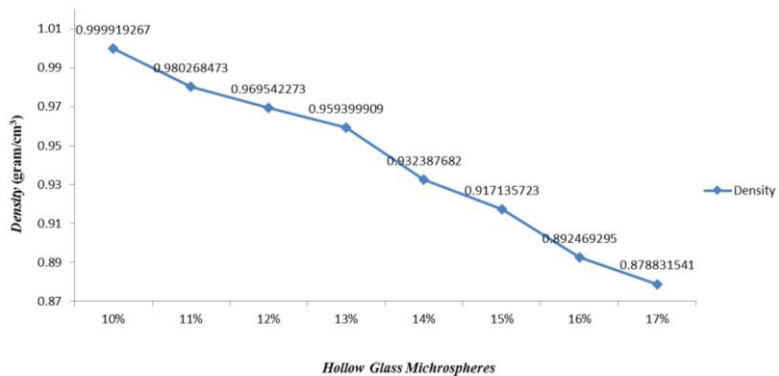
Tabel 4.3 Hasil uji tekan komposit *curing* temperatur 90°C selama 24 jam.

Material	F (N)	Ultimate Compressive Strength (MPa)		Toughness (J/mm ³)	
		Hasil	Rata-rata	Hasil	Rata-rata
C10	31956.1	105.96	105.12	15.37	15.11
	31734.4	104.87		12.30	
	31843.8	104.52		17.66	
C11	32015.6	104.03	105.32	15	16.03
	32093.8	105.7		21.89	
	32031.3	106.21		11.20	
C12	32390.6	106.68	106.07	13.8	16.77
	32062.54	104.88		16.31	
	32484.4	106.63		20.21	
C13	32812.5	108.07	107.11	16.74	17.31
	32765.6	106.47		17.77	
	32640.64	106.77		10.45	
C14	33656.3	109.73	110.57	18.33	17.99
	33343.8	109.82		21.08	
	34281.2	112.14		14.57	
C15	33812.5	11.74	112.03	18.22	18.24
	34500	114.4		17.82	
	33265.6	109.93		18.69	
C16	35937.5	122.44	115.03	18.98	18.62
	33749.97	108.2		18.97	
	37203.2	127.38		17.92	
C17	37734.39	127.81	116.7	18.83	18.99
	37281.22	126.35		17.98	
	33703.1	108.78		20.16	

Dimana :

- Kode A = spesimen *curing* temperatur 27°C selama 24 jam.
 Kode B = spesimen *curing* temperatur 27°C selama 24 jam, lalu *post-curing* temperatur 90°C selama 5 jam.
 Kode C = spesimen *curing* temperatur 90°C selama 24 jam.

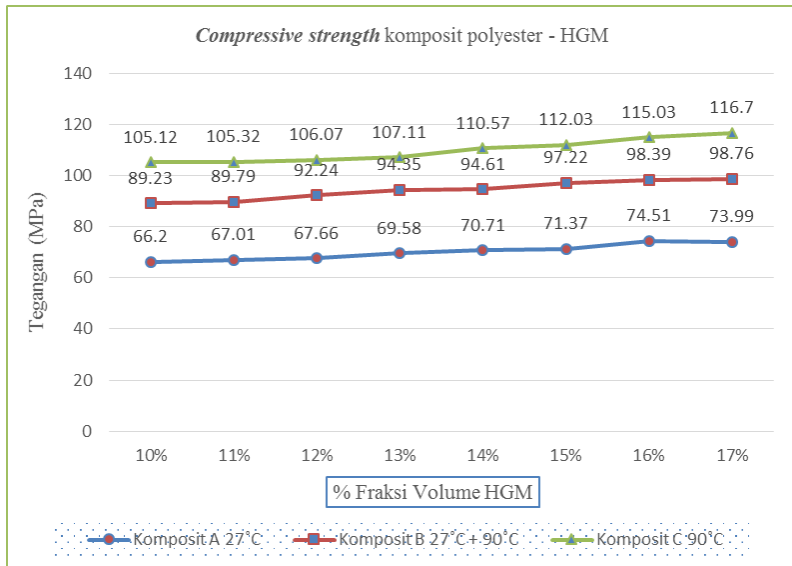
4.1.1 Pengaruh Penambahan Fraksi Volume HGM Terhadap *Density* Komposit Resin *Polyester* – HGM



Gambar 4.1 Grafik *density* komposit resin *polyester* terhadap penambahan fraksi volume HGM.

Gambar 4.1 merupakan data *density* berat komposit resin *polyester* terhadap penambahan fraksi volume *Hollow Glass Michrospheres* (HGM). Grafik pada gambar diatas, menunjukan bahwa tren grafik *density* yang terus menurun seiring dengan penambahan fraksi volume HGM. Penambahan fraksi volume HGM sebanyak 10% pada resin *polyester* memiliki *density* 1.00 gram/ml. Sedangkan penambahan fraksi volume HGM sebanyak 17% pada resin *polyester* memiliki *density* 0.88 gram/ml.

4.1.2 Pengaruh Penambahan Fraksi Volume HGM dan *Curing* – *Postcuring* Terhadap Kekuatan Tekan Komposit.



Gambar 4.2 Grafik hasil uji tekan komposit tegangan (MPa) VS fraksi volume HGM (%) untuk temperatur *curing* 27°C selama 24 jam, temperatur 27°C selama 24 jam lalu *post-curing* 90°C selama 5 jam, dan temperatur *curing* 90°C selama 24 jam.

Komposit A merupakan komposit dengan perlakuan *curing* pada temperatur ruang, 27°C selama 24 jam. Komposit B merupakan komposit dengan perlakuan *curing* pada temperatur 27°C selama 24 jam, kemudian dilanjutkan dengan *post-curing* pada temperatur 90°C selama 5 jam. Sedangkan komposit C adalah komposit dengan perlakuan *curing* temperatur 90°C selama 24 jam. Dari data hasil pengujian tekan pada gambar 4.2, menunjukkan

bahwa komposit C dengan perlakuan *curing* pada temperatur 90°C selama 24 jam memiliki kekuatan tekan paling tinggi jika dibandingkan dengan komposit B yang di-*curing* pada temperatur 27°C selama 24 jam, dan *post-curing* pada temperatur 90°C selama 5 jam. Sedangkan untuk komposit A dengan perlakuan *curing* temperatur kamar 27°C selama 24 jam memiliki kekuatan tekan yang paling rendah.

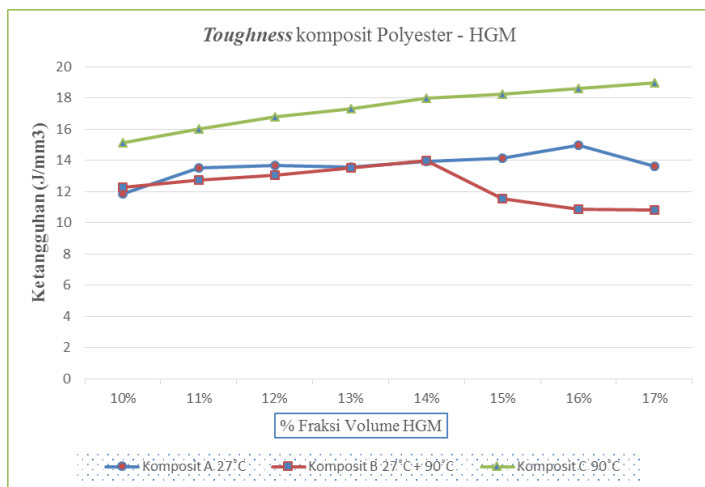
Dari hasil pengujian tekan pada gambar 4.2, komposit A dengan *curing* temperatur ruang 27°C selama 24 jam, didapatkan adanya peningkatan kekuatan tekan komposit seiring dengan penambahan fraksi volume HGM dari 10% hingga 16%. kekuatan tekan maksimum didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM 16%. Kemudian grafik kekuatan tekan menurun pada fraksi volume penambahan HGM 17%. Dari gambar 4.2 diketahui kekuatan tekan tertinggi komposit A adalah 74,51 MPa pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM sebanyak 16%. Sedangkan kekuatan tekan terendah komposit A dimiliki oleh komposit dengan penambahan fraksi volume HGM sebanyak 10% dengan nilai kekuatan 66.2 MPA.

Dari hasil pengujian tekan pada gambar 4.2, komposit B dengan *curing* temperatur ruang 27°C selama 24 jam, kemudian dilanjutkan dengan *post-curing* temperatur 90°C selama 5 jam, didapatkan adanya peningkatan kekuatan tekan komposit seiring dengan penambahan fraksi volume HGM dari 10% hingga 17%. kekuatan tekan maksimum didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM 17% dengan nilai kekuatan sebesar 98.76 MPa. Sedangkan kekuatan tekan terendah pada komposit B dimiliki oleh komposit dengan penambahan fraksi volume HGM sebanyak 10% dengan nilai kekuatan 89.23 MPA.

Dari hasil pengujian tekan pada gambar 4.2, komposit C dengan *curing* temperatur 90°C selama 24 jam, didapatkan adanya peningkatan kekuatan tekan komposit seiring dengan penambahan fraksi volume HGM dari 10% hingga 17%. kekuatan tekan

maksimum didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM 17% dengan nilai kekuatan sebesar 116.7 MPa. Sedangkan kekuatan tekan terendah pada komposit C dimiliki oleh komposit dengan penambahan fraksi volume HGM sebanyak 10% dengan nilai kekuatan 105.12 MPa.

4.1.3 Pengaruh Penambahan Fraksi Volume HGM dan Curing, Post-curing Terhadap Ketangguhan Komposit.



Gambar 4.3 Grafik ketangguhan (J/mm^3) VS fraksi volume (%) untuk temperatur *curing* 27°C selama 24 jam, temperatur 27°C selama 24 jam lalu *post-curing* 90°C selama 5 jam, dan temperatur *curing* 90°C selama 24 jam.

Komposit A merupakan komposit dengan perlakuan *curing* pada temperatur ruang, 27°C selama 24 jam. Komposit B merupakan komposit dengan perlakuan *curing* pada temperatur 27°C selama 24 jam, kemudian dilanjutkan dengan *post-curing* pada temperatur 90°C selama 5 jam. Sedangkan komposit C adalah

komposit dengan perlakuan *curing* temperatur 90°C selama 24 jam. Dari data hasil pengujian tekan pada gambar 4.3, menunjukkan bahwa komposit C dengan perlakuan *curing* pada temperatur 90°C selama 24 jam memiliki ketangguhan paling tinggi jika dibandingkan dengan ketangguhan komposit B yang di-*curing* pada temperatur 27°C selama 24 jam, *post-curing* temperatur 90°C selama 5 jam dan ketangguhan komposit A dengan perlakuan *curing* temperatur kamar 27°C selama 24 jam.

Dari hasil pengujian tekan pada gambar 4.3, komposit A dengan *curing* temperatur ruang 27°C selama 24 jam, didapatkan adanya peningkatan ketangguhan pada penambahan fraksi volume HGM 15% dan 16%. Kemudian trend grafik menurun pada fraksi volume penambahan HGM 17%. Dari gambar 4.3 didapatkan nilai ketangguhan tertinggi yang dimiliki oleh komposit A yaitu $14.97 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 16%. Sedangkan nilai ketangguhan terendah yang dimiliki oleh komposit A yaitu sebesar $11.87 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ didapat pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 10%.

Dari hasil pengujian tekan pada gambar 4.3, komposit B dengan perlakuan *curing* pada temperatur 27°C selama 24 jam, kemudian dilanjutkan dengan *post-curing* pada temperatur 90°C selama 5 jam, didapatkan adanya peningkatan ketangguhan pada penambahan fraksi volume HGM 13% dan 14%. Kemudian trend grafik menurun pada fraksi volume penambahan HGM 15% hingga 17%. Dari gambar 4.3 didapatkan nilai ketangguhan tertinggi yang dimiliki oleh komposit B yaitu $14 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 14%. Sedangkan nilai ketangguhan terendah yang dimiliki oleh komposit B yaitu sebesar $10.8 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ didapat pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 16%.

Dari hasil pengujian tekan pada gambar 4.3, komposit C dengan perlakuan *curing* temperatur 90°C selama 24 jam, didapatkan adanya peningkatan ketangguhan pada penambahan

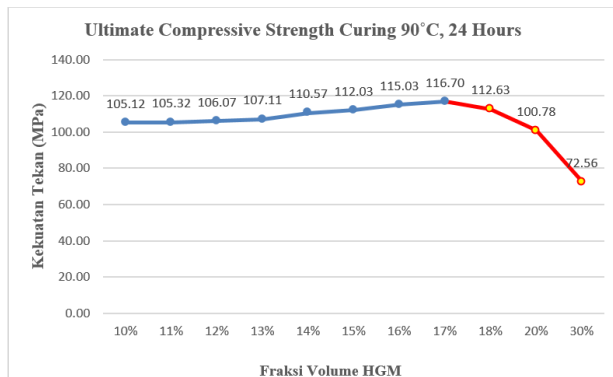
fraksi volume HGM 10% hingga 17%. Dari gambar 4.3 didapatkan nilai ketangguhan tertinggi yang dimiliki oleh komposit B yaitu sebesar $18.99 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 17%. Sedangkan nilai ketangguhan terendah yang dimiliki oleh komposit B yaitu sebesar $15.11 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ didapat pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 10%.

4.1.4 Hasil Pengujian Tekan Pengaruh Penambahan Fraksi Volume HGM 18%, 20%, 30% Terhadap Kekuatan Tekan dan Ketangguhan Komposit C, Curing Temperatur 90°C dengan Waktu Penahanan 24 Jam.

Pengujian tekan untuk spesimen C dengan penambahan variasi fraksi volume HGM sebanyak 18%, 20%, dan 30% dilakukan dengan mesin uji tekan *universal testing machine Shimadzu Corp.* milik lab. beton dan struktur jurusan Teknik Sipil ITS, berdasarkan pada standar dimensi dan pengujian komposit ASTM D695 (*Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*). Pengujian tambahan ini dilakukan hanya pada spesimen komposit C karena memiliki kekuatan tekan yang paling tinggi diantara komposit A dan komposit B. Hasil pengujian tekan pada komposit C ini bertujuan untuk melihat apakah trend grafik kekuatan dan ketangguhan terus mengalami kenaikan seiring penambahan fraksi volume HGM, ataukah trend grafik mengalami penurunan pada point – point fraksi volume HGM tertentu pada spesimen komposit dengan curing temperatur 90°C dengan waktu penahanan 24 jam. Hasil pengujian ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 4.4 Hasil uji tekan komposit penambahan variasi fraksi volume HGM 18%, 20%, 30% komposit C *curing* temperatur 90°C selama 24 jam.

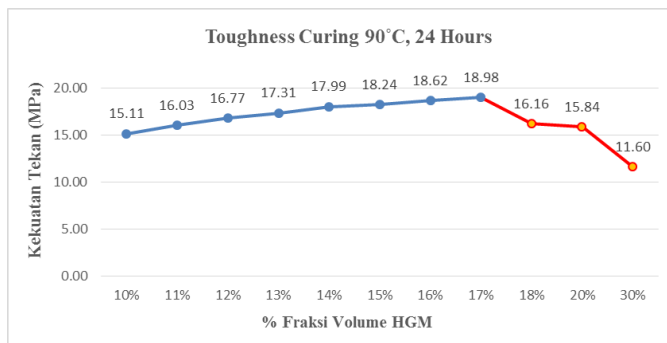
Material	F (N)	Ultimate Compressive Strength (MPa)		Toughness (J/mm ³)	
		Hasil	Rata-rata	Hasil	Rata-rata
C18	35154.38	115	112.63	16.55	16.16
	34114.13	111.68		15.55	
	34000	111.23		16.4	
C20	29899.13	98.48	100.78	13.82	15.85
	31953.13	104.53		18.02	
	30156.25	99.32		15.69	
C30	22640.62	74.07	72.56	11.66	11.6
	21984.37	71.92		11.68	
	21986	71.68		11.46	



Gambar 4.4 Grafik hasil uji tekan pengaruh penambahan fraksi volume HGM 18%, 20%, 30% terhadap kekuatan tekan komposit C temperatur *curing* 90°C selama 24 jam.

Dari hasil pengujian tekan pada gambar 4.4, komposit C dengan penambahan fraksi volume 18%, 20%, dan 30% *curing* temperatur 90°C selama 24 jam, didapatkan adanya penurunan trend grafik kekuatan tekan komposit C pada penambahan fraksi

volume HGM 18%, 20% hingga 30%. Dari gambar diatas didapatkan nilai kekuatan menurun dari 116.7 MPa (fraksi penambahan HGM 17%), menjadi 112.63 MPa pada fraksi penambahan HGM sebanyak 18%, kemudian nilai kekuatan mengalami penurunan kembali menjadi 100.78 MPa setelah penambahan sebanyak 20% HGM. Kekuatan tekan paling rendah didapat pada penambahan fraksi volume HGM 30% dengan nilai 72.56 MPa.



Gambar 4.5 Grafik hasil uji tekan pengaruh penambahan fraksi volume HGM 18%, 20%, 30% terhadap ketangguhan tekan komposit C temperatur *curing* 90°C selama 24 jam.

Dari hasil pengujian tekan pada gambar 4.5, komposit C dengan penambahan fraksi volume 18%, 20%, dan 30% *curing* temperatur 90°C selama 24 jam, didapatkan adanya penurunan trend grafik ketangguhan tekan komposit C pada penambahan fraksi volume HGM 18%, 20% hingga 30%. Dari gambar diatas didapatkan nilai ketangguhan menurun dari $18.98 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ (fraksi penambahan HGM 17%), menjadi $16.16 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ pada fraksi HGM 18%, kemudian ketangguhan mengalami penurunan kembali menjadi $15.84 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ setelah penambahan 20% HGM. Ketangguhan tekan paling rendah didapat pada penambahan fraksi volume HGM 30%, sebesar $11.6 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$.

4.2 Hasil Pengamatan Pola Patahan Hasil Pengujian Tekan Komposit Dengan Variasi Penambahan Fraksi Volume HGM, Temperatur dan Waktu *Curing* – *Postcuring*.



Gambar 4.6 Foto pecahan spesimen uji tekan komposit penambahan HGM 10% *curing* temperatur 27°C selama 24 jam



Gambar 4.7 Foto pecahan spesimen uji tekan komposit penambahan HGM 17% *curing* temperatur 27°C selama 24 jam

Pada hasil pengujian tekan komposit dengan Temperatur *curing* 27°C selama 24 jam pada komposit akan memiliki pola patahan seperti yang ditunjukkan pada gambar pada 4.6 dan gambar 4.7 Spesimen memiliki pola patahan *columnar* yaitu patahan yang menyebabkan spesimen uji terbelah. Hal ini dikarenakan spesimen uji lebih memanjang kearah lateral (menjauhi garis tengah/ bidang) pada saat pembebanan. Pola patahan yang sama juga terjadi pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 10% hingga 17%.



Gambar 4.8 Foto pecahan spesimen uji tekan komposit penambahan HGM 17% *curing* temperatur 27°C selama 24 jam – *postcuring* 90°C selama 5 jam



Gambar 4.9 Foto pecahan spesimen uji tekan komposit penambahan HGM 17% *curing* temperatur 90°C selama 24 jam



(a)

(b)

(c)

Gambar 4.10 Foto pecahan spesimen uji tekan komposit *curing* temperatur 90°C selama 24 jam (a) penambahan HGM 18%, (b) penambahan HGM 20%, (c) penambahan HGM 30%.

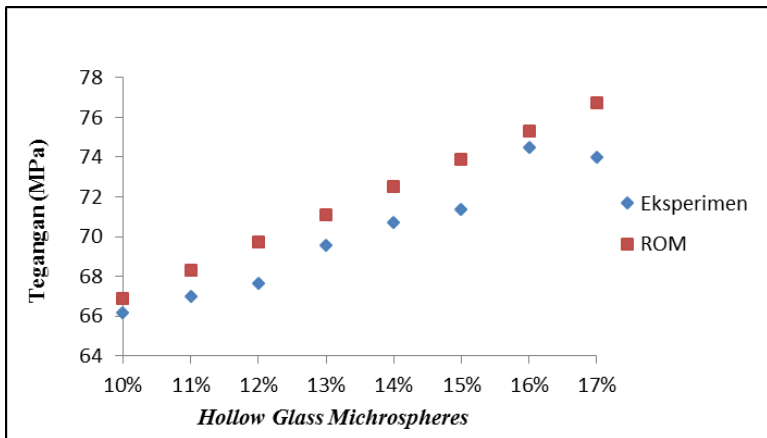
Permukaan pola patahan pada hasil pengujian tekan komposit dengan temperatur *curing* 27°C selama 24 jam *postcuring* 90°C yang ditunjukkan ada gambar 4.8 dan pola patahan hasil pengujian tekan komposit temperatur *curing* 90°C yang ditunjukkan pada gambar 4.9 terlihat bahwa kedua spesimen memiliki pola patahan *shear* (geser). Begitu juga pada gambar 4.10 dapat dilihat bahwa spesimen uji tekan mengalami patahan tanpa membelah spesimen searah aksial. Pola patahan *shear* ini terjadi pada spesimen uji dengan temperatur *curing* 27°C selama 24 jam, *postcuring* 90°C selama 5 jam dan terjadi juga pada spesimen komposit dengan temperatur *curing* 90°C selama 24 jam, rata - rata terjadi pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 16% hingga 30%.

BAB 5

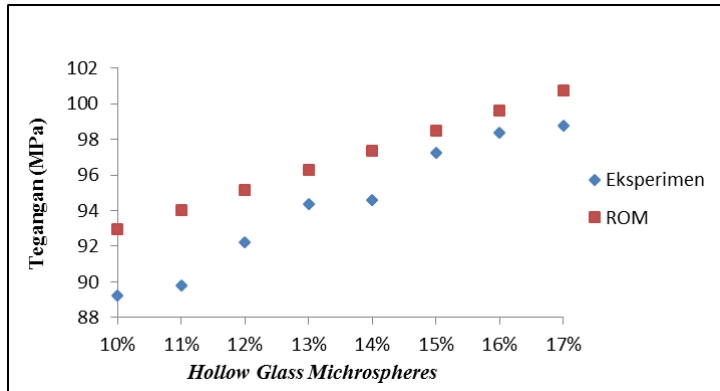
ANALISA DAN PEMBAHASAN

5.1 Pembahasan Pengaruh Variasi Fraksi Volume HGM Terhadap Kekuatan Tekan Komposit

Dengan menggunakan persamaan *Rule Of Mixture* (ROM) pada *particulate composite* maka secara teoritis kekuatan tekan komposit dengan penambahan *Hollow Glass Microspheres* (HGM) dapat dihitung.



(a)



(b)



(c)

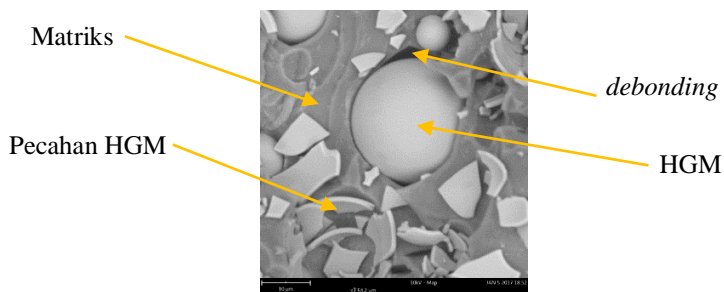
Gambar 5.1. Perbandingan antara nilai tegangan hasil pengujian tekan dan nilai tegangan teoritis hasil perhitungan. (a) Temperatur curing 27°C selama 24 jam, (b) Temperatur curing 27°C selama 24 jam, *post-curing* 90°C selama 5 jam, (c) Temperatur curing 90°C selama 24 jam.

Berdasarkan gambar grafik 5.1, terjadi perbedaan hasil antara kekuatan tekan secara teoritis dengan kekuatan tekan pada saat pengujian. HGM jenis IM30K memiliki kekuatan tekan sebesar 28000 PSI atau 193,05 MPa. *Polyester* resin murni memiliki kekuatan tekan 52.89 MPa untuk temperatur *curing* 27°C selama 24 jam. 81.81 MPa untuk temperatur *curing* 27°C selama 24 jam *post-curing* 90°C selama 5 jam. Dan 102,73 MPa untuk temperatur *curing* 90°C selama 24 jam. Pada gambar grafik 5.1 diatas dapat diketahui bahwa dengan dilakukannya penambahan fraksi volume HGM pada *polyester* dapat meningkatkan kekuatan tekannya. Pada hasil perhitungan teoritis (ROM), kekuatan tekan komposit naik seiring dengan penambahan fraksi volume HGM. Hal tersebut dikarenakan pada perhitungan teoritis, dianggap kondisi ideal terjadi yaitu adanya ikatan yang kuat antara HGM dan *Polyester*. Pada gambar grafik 5.1 diatas juga dapat dilihat selisih nilai kekuatan tekan antara hasil pengujian dan teoritis, hal ini disebabkan karena pada praktiknya tidak dijumpai asumsi seperti yang digunakan pada ROM sehingga tidak terjadi kondisi ideal, seperti *void* yang terjadi pada pembuatan komposit, distribusi penyebaran HGM tidak merata, dan tidak kuatnya ikatan antara *Polyester* dan HGM.

Dari Tabel 5.1 dengan penambahan fraksi volume HGM sebesar 15% pada *polyester curing* temperatur 27°C selama 24 jam memiliki rata-rata tegangan tekan 71.37 MPa dan mengalami peningkatan tegangan maksimum pada penambahan fraksi volume HGM 16% menjadi 74.51 Mpa. Begitu juga pada komposit yang di-*curing* temperatur 27°C selama 24 jam lalu *post-curing* 90°C selama 5 jam pada fraksi volume HGM 16% sebesar 98.39 Mpa menjadi 98.76 Mpa pada fraksi volume HGM 17%. Sama halnya dengan komposit yang di-*curing* temperatur 90°C selama 24 jam pada fraksi volume HGM 16% sebesar 115.03 Mpa menjadi 116.7 Mpa pada fraksi volume 17%. Trend grafik tegangan tekan yang menurun setelah penambahan HGM 16% pada komposit A dan 17% pada komposit B, komposit C disebabkan karena semakin banyak HGM maka akan semakin banyak yang harus diikat oleh

polyester, sedangkan persebaran HGM tidak bisa merata akibat dari pengaruh perlakuan suhu dan density HGM, sehingga ikatan *crosslink* antara matriks *polyester* dan *reinforce* HGM semakin sedikit. Begitu pula dengan fraksi volume HGM dibawah 17% akan mengalami kekuatan tekan yg lebih rendah. Hal ini terjadi karena gaya yang diberikan pada komposit banyak diterima oleh *polyester*-nya.

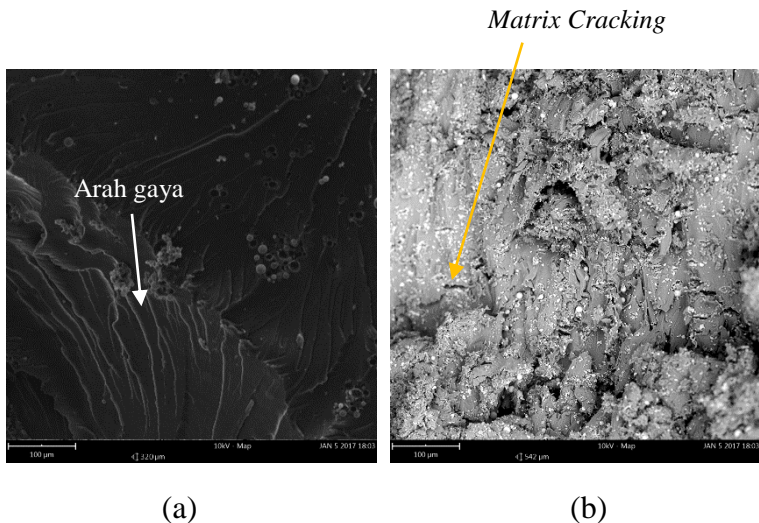
Peningkatan kekuatan tekan dan ketangguhan pada komposit dengan penambahan fraksi volume HGM disebabkan *Hollow Glass Microspheres* yang berbentuk bulat dan berongga pada bagian dalamnya dapat membantu menahan laju retakan (*crack*) yang menjalar pada komposit serta *polyester* sebagai matriks dan turut menyalurkan beban yang terjadi kepada butiran HGM lainnya. Apabila material komposit dengan penambahan *microspheres* dikenai beban tekan, butiran HGM yang terbentuk bulat dan melekat pada matriks *polyester* membantu memperlambat laju retakan yang terjadi sehingga kekuatan tekan pada komposit juga meningkat. Pada gambar 5.2 dapat terlihat *microsphere* yang menahan laju retakan mengalami deformasi pada bagian – bagian dinding sehingga tidak mampu lagi menahan retakan dan akhirnya rusak. *Microsphere* yang telah rusak akan menyisakan cangkang atau dindingnya pada matrix.



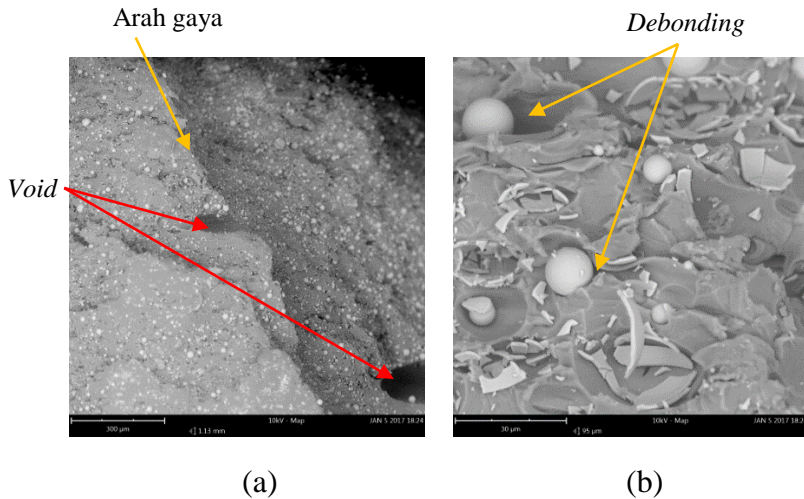
Gambar 5.2 HGM dan fenomena *debonding* pada komposit (SEM) perbesaran 5000x

5.2 Pengamatan Hasil SEM Pada Patahan Pengujian Tekan

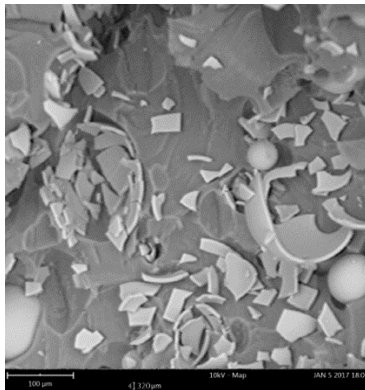
Pada pengamatan pola patahan komposit pengujian tekan, didapatkan mekanisme kegagalan komposit yang hampir sama pada tiap spesimen. Yaitu adanya *debonding* yang terjadi akibat tidak kuatnya ikatan antara HGM dan *polyester* sehingga menyebabkan HGM terlepas dari matriksnya, *matrix cracking* yang terjadi akibat ketidakmampuan dari matriks untuk menahan regangan yang terjadi sehingga timbul retakan dan adanya HGM yang telah rusak akibat tidak mampu menahan pembebanan.



Gambar 5.3 Hasil SEM komposit dengan penambahan HGM 10 % *curing* temperatur 27°C selama 24 jam dengan pembesaran (a) 150x (b) 500x

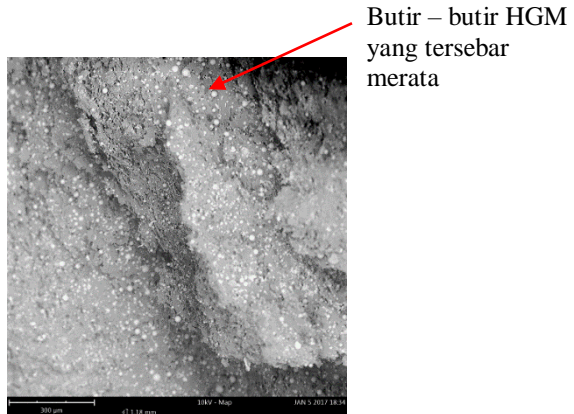


Gambar 5.4 Hasil SEM komposit dengan penambahan HGM 17%
curing temperatur 27°C selama 24 jam dengan pembesaran
 (a) 240x, (b) 2850x

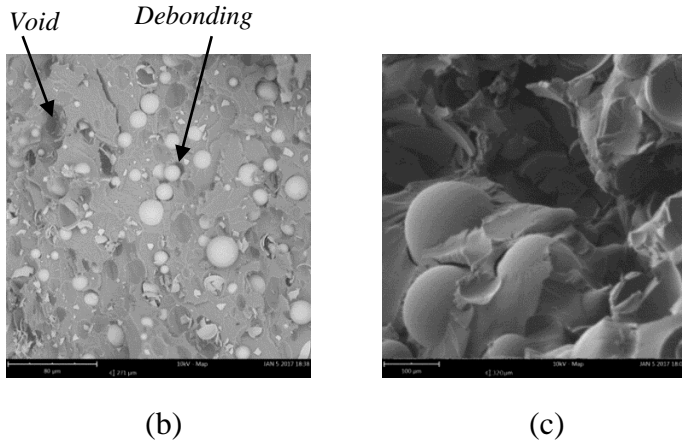


Gambar 5.5 pecahan HGM yang telah rusak akibat
 pembebanan (SEM perbesaran 5000x)

Pada hasil SEM pola patahan komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 10% dan 17% yang ditunjukkan gambar diatas (gambar 5.3 dan gambar 5.4), terdapat beberapa void berupa titik - titik hitam pada perbesaran 240x dan adanya *matrix cracking* yang terjadi akibat ketidakmampuan dari matriks untuk menahan regangan yang ada sehingga timbul retakan. *Void* terjadi akibat terperangkapnya udara pada proses pembuatan komposit. Pada perbesaran 2850x terjadi *debonding* Antara HGM dan matriks sehingga menyebabkan bekas pada matriks berupa lingkaran yang semula menjadi tempat melekatnya HGM. Penampakan *debonding* lebih jelas terlihat pada gambar 5.2 dengan perbesaran 5000x. Serta tampak juga bekas HGM yang telah rusak akibat tidak mampu menahan pembebanan. Penampakan HGM yang rusak lebih jelas terlihat pada gambar 5.5 dengan perbesaran 5000x.



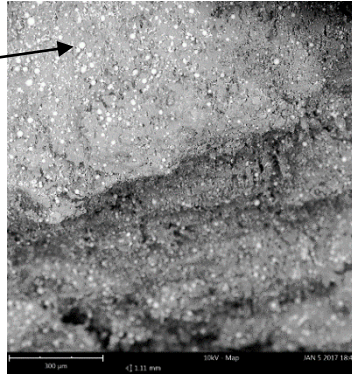
(a)



Gambar 5.6 Hasil SEM komposit penambahan HGM 17 % *curing* temperatur 27°C selama 24 jam - *postcuring* 90 °C selama 5 jam dengan perbesaran (a) 230x (b) 1000x (c) 6000x

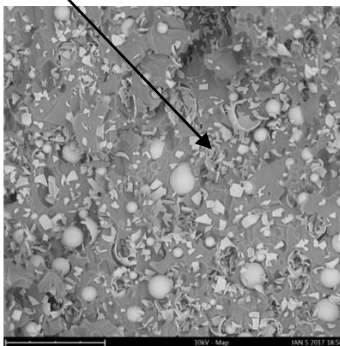
Dari hasil SEM pola patahan komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 17% *curing* temperatur 27°C selama 24 jam dan *postcuring* 90 °C selama 5 jam pada gambar 5.6, dapat dilihat permukaan patah tampak sedikit terang dan sedikit berserabut. Karena komposit temperatur *postcuring* belum melewati Tg, maka pola patahan termasuk getas. Pada waktu dilakukan *postcuring* , material mencapai mendekati Tg, dimana pada kondisi ini molekul-molekul material menerima lebih banyak energy dan meningkatkan pergerakan molekul-molekul tersebut. Molekul tersusun ulang, mudah meregang dan membentuk ikatan *crosslink*. Pada komposit ini *debonding* masih ditemukan pada perbesaran 1000x. *Debonding* disebabkan lemahnya atau tidak terjadinya ikatan yang sempurna antara HGM dan *polyester* sehingga HGM terlepas dari matrix dan menyebabkan bekas pada matrix berupa lingkaran yang semula menjadi tempat melekatnya HGM. Tampak juga bekas HGM yang telah rusak akibat tidak sanggup lagi menahan beban.

Butiran HGM
lebih banyak



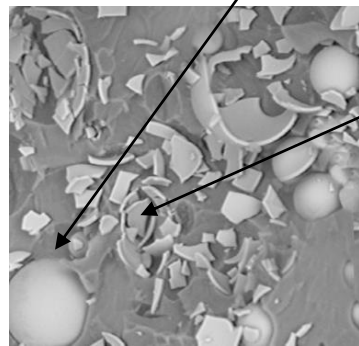
(a)

Banyak HGM pecah



(b)

Debonding tidak
begitu tampak



HGM
pecah

(c)

Gambar 5.7 Hasil SEM komposit dengan penambahan HGM 17 % *curing* temperatur 90°C selama 24 jam dengan pembesaran (a) 245x (b) 1800x (c) 3000x

Dari hasil SEM pola patahan komposit dengan penambahan HGM 17% *curing* temperatur 90 °C selama 24 jam pada gambar 5.7, dapat dilihat pada komposit perbesaran 3000x hampir tidak tampak void (udara yang terperangkap pada proses pembuatan komposit) yang berupa titik-titik hitam. Permukaan patah juga tampak terang dan sedikit berserabut, maka pola patahan ini termasuk kaku dan getas. Panas yang diberikan sebesar 90°C dapat membantu meningkatkan sifat mekaniknya, karena seiring dengan meningkatnya temperatur, maka aktivitas molekul dan polimerisasi juga meningkat, sehingga derajat kristalinitas akan meningkat. Dengan meningkatnya derajat kristalinitas maka karakteristik mekanikalnya berubah dari elastis menjadi kaku dan getas. Dan ketika material didinginkan maka mobilitas molekul akan turun dan menyebabkan material menjadi kaku kembali. Fenomena ini menyebabkan material mengalami peningkatan kekuatan tekan.

Pada gambar SEM perbesaran 1800x hampir seluruh HGM mengalami pecah. Tidak ada HGM yang bergeser dari matriks sehingga debonding tidak begitu tampak. Oleh sebab itu, ketika komposit mendapat beban tekan, seluruh HGM akan menerima energi. Hal tersebut yang menyebabkan kekuatan tekan pada komposit sangat optimal.

Pada proses *curing* yang menggunakan temperatur 90°C, molekul-molekul *polyester* resin dan *hardener* akan mendapatkan energi lebih banyak untuk lebih aktif bergerak dalam membentuk ikatan *crosslink*. Sehingga ikatan *crosslink* yang terjadi pada *polyester* murni yang di-*curing* 90°C akan lebih banyak jika dibandingkan dengan *curing* temperatur 27°C. Ikatan *crosslink* yang lebih banyak pada matriks akan meningkatkan nilai kekuatan tekannya. Jika matriks sebagai pengikat HGM lebih banyak memiliki ikatan *crosslink*, maka *debonding* yang terjadi pada HGM dan *polyester* akan berkurang dan nilai kekuatan tekan pada polimer komposit tersebut akan meningkat.

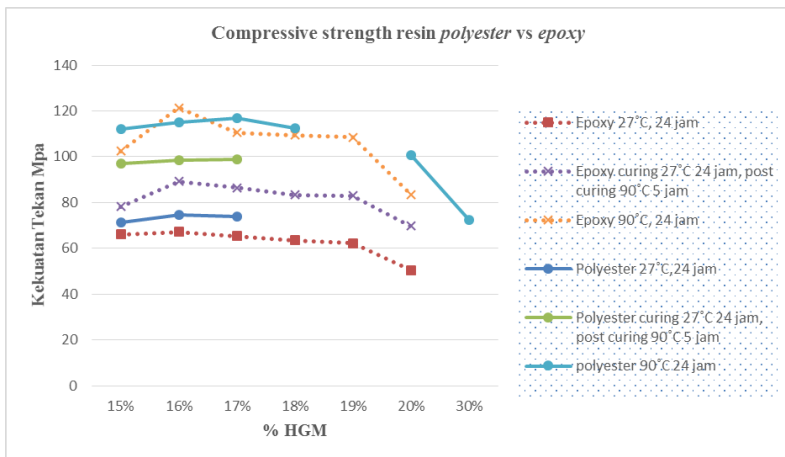
Terdapat perbedaan tegangan tekan antara hasil pengujian tekan komposit *curing* temperatur 27°C selama 24 jam, *curing* temperatur 27°C selama 24 jam, lalu *post-curing* 90°C selama 5 jam, dan *curing* temperatur 90°C selama 24 jam. Komposit yang di-*curing* pada temperatur 90°C selama 24 jam akan memiliki tegangan tekan lebih tinggi jika di bandingkan komposit yang di-*curing* temperatur 27°C selama 24 jam, lalu *post-curing* 90°C selama 5 jam, dan juga *curing* temperatur 90°C selama 24 jam.

Gabungan srtuktur antara *resin* dan *hardener* yang banyak akan membentuk ikatan *crosslink*. Pada proses *curing* yang menggunakan temperatur 90°C, molekul-molekul *polyester* resin dan *hardener* akan mendapatkan energi lebih banyak untuk lebih aktif bergerak dalam membentuk ikatan *crosslink*. Sehingga ikatan *crosslink* yang terjadi pada *polyester* murni yang di-*curing* 90°C akan lebih banyak dibandingkan dengan *curing* temperatur 27°C.

Ikatan *crosslink* yang lebih banyak pada matriks akan meningkatkan nilai kekuatan tekannya. Jika matriks sebagai pengikat HGM lebih banyak memiliki ikatan *crosslink*, maka *debonding* yang terjadi pada HGM dan *polyester* akan berkurang dan nilai kekuatan tekan pada polimer komposit tersebut akan meningkat.

5.3 Perbandingan Pengaruh Penambahan Fraksi Volume HGM, Temperatur, Waktu *Curing* dan *Post-curing* Terhadap Karakteristik Tekan dan Ketangguhan antara Resin *Polyester* dan *Epoxy*.

Penelitian sebelumnya tentang pengaruh penambahan variasi fraksi volume HGM, temperatur curing, post-curing dan waktu penahanannya terhadap karakteristik tekan komposit *epoxy* – HGM pernah dilakukan oleh Widyansyah Ritonga pada tahun 2014^[4]. Berikut dibawah ini adalah grafik perbandingan nilai kekuatan tekan dan ketangguhan antara resin *polyester* dan resin *epoxy* terhadap penambahan fraksi volume HGM, temperatur curing, post-curing dan waktu penahanannya yang didapat dari hasil eksperimen.



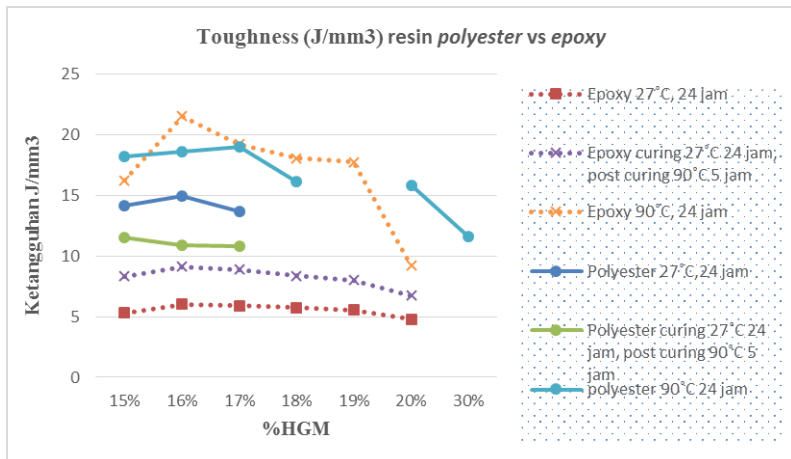
Gambar 5.8 Grafik pengaruh penambahan fraksi volume HGM, temperatur, waktu *curing* dan *post-curing* terhadap nilai kekuatan tekan antara resin *polyester* dan *epoxy*

Berdasarkan gambar grafik 5.8 diatas, dapat dilihat perbandingan nilai kekuatan tekan antara komposit resin *polyester* dan *epoxy curing* temperatur 27°C dengan waktu penahanan 24 jam. Kekuatan tekan maksimum komposit resin *polyester* sebesar 74.51 MPa didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 16%. Sedangkan kekuatan tekan maksimum komposit resin *epoxy* sebesar 67.19 MPa didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 16%.

Berdasarkan gambar grafik 5.8 diatas, dapat dilihat perbandingan nilai kekuatan tekan antara komposit resin *polyester* dan *epoxy curing* temperatur 27°C dengan waktu penahanan selama 24 jam, *post-curing* 90°C selama 5 jam. Untuk kekuatan tekan maksimum komposit resin *polyester* sebesar 98.76 MPa didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 17%. Sedangkan kekuatan tekan maksimum komposit resin *epoxy* sebesar 89.24 MPa didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 16%.

Berdasarkan gambar grafik 5.8 diatas, dapat dilihat perbandingan nilai kekuatan tekan antara komposit resin *polyester* dan *epoxy curing* temperatur 90°C dengan waktu penahanan selama 24 jam. Untuk kekuatan tekan maksimum komposit resin *polyester* sebesar 116.7 MPa didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 17%. Sedangkan kekuatan tekan maksimum komposit resin *epoxy* sebesar 121.28 MPa didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 16%.

Jadi dapat disimpulkan bahwa penambahan fraksi volume HGM 16% hingga 17% pada *polyester* dan *epoxy* dapat meningkatkan kekuatan tekannya. Sedangkan peningkatan temperatur *curing* menjadi 90°C dengan waktu penahanan selama 24 jam dapat meningkatkan jumlah ikatan *crosslink* pada matriks *polyester* dan *epoxy*, sehingga kekuatan tekannya menjadi maksimal.



Gambar 5.9 Grafik pengaruh penambahan fraksi volume HGM, temperatur, waktu *curing* dan *post-curing* terhadap nilai ketangguhan antara resin *polyester* dan *epoxy*

Berdasarkan gambar grafik 5.9 diatas, dapat dilihat perbandingan nilai ketangguhan antara komposit resin *polyester* dan *epoxy curing* temperatur 27°C dengan waktu penahanan 24 jam. Ketangguhan maksimum komposit resin *polyester* sebesar 14.97×10^{-3} (J/mm³) didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 16%. Sedangkan ketangguhan maksimum komposit resin *epoxy* sebesar 6.02×10^{-3} (J/mm³) didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 16%.

Berdasarkan gambar grafik 5.9 diatas, dapat dilihat perbandingan nilai ketangguhan antara komposit resin *polyester* dan *epoxy curing* temperatur 27°C dengan waktu penahanan selama 24 jam, *post-curing* 90°C selama 5 jam. Ketangguhan maksimum komposit resin *polyester* sebesar 11.55×10^{-3} (J/mm³) didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 15%.

Sedangkan ketangguhan maksimum komposit resin *epoxy* sebesar 9.13×10^{-3} (J/mm³) didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 16%.

Berdasarkan gambar grafik 5.9 diatas, dapat dilihat perbandingan nilai ketangguhan antara komposit resin *polyester* dan *epoxy curing* temperatur 90°C dengan waktu penahanan 24 jam. Ketangguhan maksimum komposit resin *polyester* sebesar 18.98×10^{-3} (J/mm³) didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 17%. Sedangkan ketangguhan maksimum komposit resin *epoxy* sebesar 21.54×10^{-3} (J/mm³) didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 16%.

Jadi dapat disimpulkan bahwa penambahan fraksi volume HGM 16% hingga 17% pada *polyester* dan *epoxy* dapat meningkatkan ketangguhan tekannya. Sedangkan peningkatan temperatur *curing* menjadi 90°C dengan waktu penahanan selama 24 jam dapat meningkatkan jumlah ikatan *crosslink* pada matriks *polyester* dan *epoxy*, sehingga ketangguhan tekannya menjadi lebih maksimal.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari penelitian dan analisa data yang telah dilakukan pada komposit *Polyester - Hollow Glass Microspheres*, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penambahan fraksi volume HGM 16% hingga 17% pada *polyester* dapat meningkatkan kekuatan tekannya. Kekuatan tekan maksimum komposit sebesar 116.7 MPa didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 17%.
2. Penambahan fraksi volume HGM 16% hingga 17% pada *polyester* dapat meningkatkan ketangguhan. Ketangguhan maksimum sebesar $18,98 \times 10^{-3}$ (J/mm³) didapatkan pada penambahan fraksi volume HGM sebanyak 17%.
3. Peningkatan temperatur *curing* dapat meningkatkan jumlah ikatan *crosslink* pada matriks *polyester*. Komposit dengan penambahan fraksi volume HGM 17% yang di-*curing* pada temperatur 90°C dengan waktu penahanan selama 24 jam merupakan komposit yang memiliki kekuatan dan ketangguhan tekan yang paling tinggi.
4. Peningkatan jumlah ikatan *crosslink* pada matriks *polyester* akan meningkatkan kekuatan tekan pada komposit dengan fraksi volume HGM yang sama.

6.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlunya penyebaran HGM yang lebih merata agar dapat mengisi matriks pada *polyester* sehingga *void* tidak banyak ditemukan, sehingga dapat menaikkan kekuatan mekaniknya secara sempurna.
2. Perlu adanya metode atau alat khusus agar proses pencampuran *hollow glass microspheres* dapat tercampur merata.
3. Penelitian lebih lanjut bisa dikembangkan dengan menggunakan HGM dengan ukuran butir yang bervariasi.
4. Penelitian lebih lanjut bisa dikembangkan dengan menggunakan variasi temperatur *curing* 70°C, 80°C, dan 90°C dengan waktu penahanan selama 5 jam dan *post-curing* 24 jam.
5. Mengganti furnace konvensional dengan furnace yang memiliki kestabilan dalam menentukan nilai temperatur dan yang lebih modern.
6. Proses pembuatan komposit *polyester*–HGM menggunakan alat vakum untuk menghindari adanya udara terjebak dalam komposit atau *void*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Park, metals, *Composites*, **ASM International handbook Vol 1**. 1987
- [2] Irwan Nugraha Saputra. 2012. “*Pengaruh Variasi Fraksi Volume, Temperatur dan Waktu Terhadap Karakteristik Tarik Komposit Polyester Partikel Hollow Glass Microspheres*”. Laboratorium Metallurgy Teknik Mesin ITS. Indonesia
- [3] Kevin Yoga Pradana. 2013. “*Pengaruh variasi fraksi volume, temperatur, dan waktu post-curing terhadap karakteristik bending komposit polyester – patikel hollow glass microspheres*”. Laboratorium Metallurgy Teknik Mesin ITS. Indonesia
- [4] Widyansyah Ritonga. 2014. “*Pengaruh Variasi Fraksi Volume, Temperatur Curing dan Post-Curing Terhadap Karakteristik Tekan Komposit Epoxy - Hollow Glass Microspheres IM30K*”. Laboratorium Metallurgy Teknik Mesin ITS. Indonesia
- [5] Kaw, Autar, 2006, *Mechanics of Composite Materials 2nd Edition*. Boca Raton : Taylor and Francis Group
- [6] Callister, Jr.William.D, 2007, “*Material Sciene And Engineering An Introduction.*” United State of America.Quebeecor Versailles.
- [7] Mallick, P.K., *Fibre Reinforced Composite Materials, Manufacturing and Design*, Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- [8] Introduction to Composite Materials.
<http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/compo_sites/comp_intro.cfm>
[Diakses pada: 23 September 2016]

- [9] K. Y. Peter Wong, *“Measurement of Mechanical, Electrical and Thermal Properties of Glass Powder Reinforced Epoxy Composites and Modelling”*, University of Southern Queensland, 2012.
- [10] Kumar Sanjeev, *“An Experimental Study on Effects of Thermal Cycling on Cast Alluminium Composites Reinforced with Silicon Carbide and Fly Ash Particles”*, Thapar University India, 2010.
- [11] Surdia, T., dan Shinroku, S., *“Pengetahuan Bahan Teknik”*, Jakarta: P.T. Pradnya Paramita 1995.
- [12] **PT. Justus Kimia Raya**, Spesifikasi Resin YUKALAC BQTN 157.
- [13] **3M**, 3M Glass Bubbles k42HS, 3M center, St. Paul, USA.
- [14] <http://www.ecvv.com/product/3822975.html>
- [15] R. J. Cardoso, A. Shukla, A. Bose, *“Effect of Particle Size and Surface Treatment on Constitutive Properties of Polyester-Cenosphere Composites”*, University of Rhode Island, Journal of Material Science 37 (2012) 603-613.
- [16] Daniel Jung, *“Performance and Properties of Embedded Microspheres for Self-Repairing Applications”*, B. S., Cornell University, 1995.
- [17] Ismoyo,1990. *“Pengujian merusak tekan material”*
- [18] Annual Book of **ASTM International Standarts, D 695-02a**, *Standart Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*, American Society for Testing and Materials, 2002.
- [19] ASM International, *“Characterization and Failure Analysis of Plastics”*, page 117, December 2003

- [20] Fachmi Yuni Arista. 2013. "***Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Fraksi Volume Epoxy-Hollow Glass Microspheres dan Temperatur Curing Terhadap Karakteristik Tekan Komposit***". Laboratorium Metallurgy Teknik Mesin ITS. Indonesia
- [21] The Advantages of Epoxy Resin versus Polyester in Marine Composite Structure, **SP-systems**, undated.
- [22] Aruniit, Aare. Kers, Jaan. Krumme, Andres. Poltimae, Triinu. Tall, Kaspar, ***Preliminary Study of the Influence of Post-Curing Parameters to the Particle Reinforced Composite's Mechanical and Physical Properties***, Tallinn University of Technology, Estonia, 2011
- [23] Gede Alvin Pramanda Wijaya. 2016 "***Pengaruh Variasi Fraksi Volume Hollow Glass Microspheres, Temperatur curing dan Post-curing Pada Komposit Partikel Polyester – HGM Terhadap Karakteristik Tarik***". Laboratorium Metallurgy Teknik Mesin ITS. Indonesia.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



CHANDRA PRASTYADI lahir pada 23 September 1991 di Madiun, Jawa Timur. Berasal dari keluarga sederhana yang berkultur pendidikan. Lulus pendidikan formal di SD Negeri Klegen 02 Kota Madiun pada tahun 2003. Selanjutnya meneruskan sekolah di SMP Negeri 3 Kota Madiun, lulus tahun 2006, dan di SMA Negeri 3 Kota Madiun, lulus tahun 2009. Selepas SMA diterima di Jurusan D3 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Kemudian pada tahun 2012 penulis melanjutkan studi di Jurusan S1 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, lulus tahun 2017.

Selama masa studi di Jurusan Teknik Mesin ITS, penulis aktif dalam berbagai kegiatan kemahasiswaan yang dinamis. Diluar itu penulis juga bekerja diluar kampus sebagai fotografer dan desain grafis, memiliki usaha sendiri di Kota Surabaya sebagai *founder* di perusahaan yang bergerak dibidang jasa percetakan dan *Creative Agency* dengan nama CMYK Creative sejak tahun 2010 hingga sekarang. Cita-cita terbesar penulis adalah membahagiakan kedua orang tua dan mampu membantu memperbaiki perekonomian Indonesia dengan cara menggerakkan bisnis industri lokal yang kreatif.

Penulis dapat dihubungi melalui alamat *e-mail*:
chandraprastyadi@gmail.com